



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE VARIACIONES GEOMÉTRICAS LOCALES EN LA VIDA A FATIGA DE UN EJE FERROVIARIO

Autor: Daniel Soleto Ramos

Tutor: D. Higinio Rubio Alonso

D. Juan Carlos García Prada

Diciembre, 2011



Título: Estudio de la influencia de variaciones geométricas locales en la vida a fatiga de un eje ferroviario.

Autor: Daniel Soletto Ramos.

Director: Higinio Rubio Alonso.

Codirector: Juan Carlos García Prada.

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE





Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a Higinio Rubio Alonso y Juan Carlos García Prada la ayuda que me han prestado y los conocimientos que me han enseñado durante este trabajo, ya que la realización y consecución del presente proyecto de fin de carrera no hubiese sido posible sin su colaboración.

También quiero agradecer a mi compañero Alejandro Hernández García su apoyo durante toda la carrera, y en especial en estos últimos 8 meses, ya que sin su colaboración no habría podido alcanzar los objetivos propuestos para el presente proyecto.

Por último, y no por ello menos importante, agradecer a mis padres, mi hermano, y a Gloria todo el ánimo que me han dado durante toda la carrera y más concretamente durante este trabajo.





Resumen

El siguiente proyecto se centra en el estudio a fatiga de un eje ferroviario en servicio y de la influencia que sobre él pudieran tener ciertas variaciones geométricas en la superficie del mismo.

Se realizarán una serie de análisis estáticos y de fatiga con diferentes geometrías y condiciones para valorar los resultados obtenidos y evaluar las consecuencias que pudiera tener sobre el eje.

Para la realización de este trabajo, se hará uso del programa de diseño mecánico y de Elementos Finitos Pro Engineer.

Palabras clave: eje ferroviario, estático, dinámico, grietas por fatiga, ciclos.





Abstract

The following project focuses on the fatigue study of a railway axle in service, and on the influence that certain geometric variations in the surface of the axle may cause to it.

There will be made a series of static and fatigue analysis under different conditions and geometries in order to value the results and to assess the consequences that could have on the shaft.

For the making of this work, the mechanic design and Finite Elements program Pro Engineer, will be used

Keywords: railway axle, static, dynamic, fatigue crack, cycles.





ÍNDICE

1. Introducción.....	2
1.1. <i>Ámbito o motivación.</i>	<i>2</i>
1.2. <i>Objetivos.</i>	<i>5</i>
1.3. <i>Etapas del proyecto.</i>	<i>6</i>
1.4. <i>Estructura del documento.</i>	<i>8</i>
2. Fenómenos de fatiga.	10
2.1. <i>Introducción.</i>	<i>10</i>
2.2. <i>Historia de los fallos de fatiga.</i>	<i>10</i>
2.3. <i>Historia del análisis de fatiga.</i>	<i>15</i>
2.4. <i>Estado del arte.</i>	<i>17</i>
3. Fundamentos de la fractura.	20
3.1. <i>Introducción.</i>	<i>20</i>
3.2. <i>Análisis de fallos.</i>	<i>20</i>
3.3. <i>Clasificación de los fallos.</i>	<i>20</i>
3.3.1. <i>Según la sollicitación.</i>	<i>20</i>
3.3.2. <i>Según el tipo de fractura.</i>	<i>21</i>
3.4. <i>Tipos de fractura.</i>	<i>22</i>
3.4.1. <i>Fráctura dúctil.</i>	<i>22</i>
3.4.2. <i>Fractura frágil.</i>	<i>23</i>
3.5. <i>Grietas por fatiga.</i>	<i>24</i>
3.5.1. <i>Iniciación de grietas por fatiga.</i>	<i>24</i>
3.5.2. <i>Propagación de grietas por fatiga.</i>	<i>25</i>
3.6. <i>Defectos y concentración de tensiones.</i>	<i>28</i>
3.6.1. <i>Concentración de tensiones.</i>	<i>28</i>
4. Mecánica de la fractura.....	31
4.1. <i>Criterios de diseño.</i>	<i>31</i>
4.1.1. <i>Criterio convencional de diseño en un componente sin defectos.</i>	<i>31</i>
4.1.2. <i>Criterio convencional de diseño en un componente fisurado.</i>	<i>32</i>
4.2. <i>Criterio de falla por fractura bajo conceptos de mecánica de fractura elástica lineal... ..</i>	<i>32</i>
4.3. <i>Modos de fractura.</i>	<i>34</i>
5. Mecánica de la fatiga.	36
5.1. <i>Fundamentos de fatiga.</i>	<i>36</i>
5.1.1. <i>Características de la rotura por fatiga.</i>	<i>36</i>
5.1.2. <i>Estadios de fatiga.</i>	<i>37</i>



5.2.	<i>Curvas s-n (stress – number of cycles).</i>	39
5.2.1.	<i>Zonas en el diagrama de fatiga.</i>	41
5.2.2.	<i>Curvas s-n para distintos tipos de esfuerzos</i>	42
5.2.3.	<i>Coeficientes modificativos del límite de fatiga o coeficientes de marin.</i>	42
5.2.4.	<i>Factor de acabado superficial Ka.</i>	44
5.2.5.	<i>Factor de tamaño Kb.</i>	44
5.2.6.	<i>Factor de confiabilidad KC.</i>	46
5.2.7.	<i>Factor de temperatura Kd.</i>	46
5.2.8.	<i>Factor de concentración de tensiones ke.</i>	47
5.2.9.	<i>Factor de defectos diversos kf.</i>	49
5.3.	<i>Esfuerzos fluctuantes.</i>	51
5.4.	<i>Métodos de análisis de fatiga con esfuerzo medio no nulo.</i>	52
5.4.1.	<i>Criterio de goodman.</i>	52
5.4.2.	<i>Criterio de soderberg.</i>	53
5.4.3.	<i>Criterio de gerber.</i>	53
5.5.	<i>Línea de carga.</i>	54
5.6.	<i>Daño acumulativo.</i>	55
5.6.1.	<i>Modelos de acumulación de daños de fatiga.</i>	56
5.7.	<i>Influencia del medio ambiente en la fatiga.</i>	58
6.	<i>Técnicas de diagnóstico. Inspección no destructiva.</i>	60
6.1.	<i>Introducción.</i>	60
6.2.	<i>Ensayos de materiales.</i>	60
6.3.	<i>Inspección no destructiva en materiales.</i>	61
6.4.	<i>Principales métodos de inspección no destructiva.</i>	62
6.5.	<i>Técnicas de inspección superficial.</i>	62
6.7.	<i>Otras técnicas de inspección no destructivas.</i>	79
6.8.	<i>Selección del método de análisis.</i>	86
7.	<i>Planteamiento del problema.</i>	88
7.1.	<i>Descripción del problema.</i>	88
7.2.	<i>Herramientas a utilizar.</i>	89
7.3.	<i>Simplificaciones realizadas.</i>	95
7.4.	<i>Caracterización del eje ferroviario.</i>	96
7.4.1.	<i>Definición del material.</i>	96
7.5.	<i>Modelado de los elementos mecánicos.</i>	96
7.5.1.	<i>Modelado del eje.</i>	96
7.5.2.	<i>Definición y geometría de las grietas.</i>	99
8.	<i>Configuración de los análisis. Preparación del eje.</i>	103
8.1.	<i>Demostración de la simetría del eje.</i>	103



8.2.	<i>Cargas y restricciones.</i>	105
8.3.	<i>Análisis estático del eje ferroviario.</i>	108
8.4.	<i>Análisis a fatiga del eje ferroviario.</i>	112
8.4.1.	<i>Parámetros que varían en función de los resultados deseados.</i>	116
8.4.2.	<i>Configuración del análisis previo.</i>	116
8.4.3.	<i>Resultados posibles tras el análisis a fatiga.</i>	116
9.	<i>Metodología.</i>	119
9.1.	<i>Estudios previos. Estudios de verificación.</i>	119
9.1.1.	<i>Estudio de precarga.</i>	119
9.1.2.	<i>Evolución de la vida a fatiga de un eje ante la aparición y crecimiento de grieta con número de ciclos constante.</i>	119
9.2.	<i>Evolución de la vida a fatiga de un eje ante la aparición y crecimiento de una grieta con número de ciclos variable.</i>	120
9.2.1.	<i>Evolución de la vida a fatiga de un eje ante la aparición y crecimiento de una grieta con número de ciclos variable (con singularidades).</i>	122
9.3.	<i>Estudio de modificación de fatiga. Variación del tamaño de elemento máximo de malla...</i>	122
10.	<i>Análisis y resultados.</i>	125
10.1.	<i>Estudios previos. Estudios de verificación.</i>	125
10.1.1.	<i>Estudio de precarga.</i>	125
10.1.2.	<i>Evolución de la vida a fatiga de un eje ante la aparición y crecimiento de una grieta con número de ciclos constante.</i>	131
10.2.	<i>Evolución de la vida a fatiga de un eje ante la aparición y crecimiento de una grieta con número de ciclos variable.</i>	141
10.2.1.	<i>Estudio de las singularidades originadas en los análisis.</i>	149
11.	<i>Conclusiones y trabajos futuros.</i>	165
11.1.	<i>Conclusiones</i>	165
11.2.	<i>Trabajos futuros.</i>	169
12.	<i>Presupuesto.</i>	171
13.	<i>Bibliografía.</i>	175
14.	<i>Anexos</i>	178



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Ejes ferroviarios.....</i>	<i>2</i>
<i>Ilustración 2. Operario realizando una inspección mediante ultrasonidos.</i>	<i>3</i>
<i>Ilustración 3. Accidente ferroviario de Viareggio.</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 4. Pintura del accidente ferroviario producido en Versalles en 1842.</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 5. Accidente ferroviario en Amstetten debido al fallo de los ejes de la locomotora.</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 6. Imagen del accidente ferroviario de Rickerscote, Stafford.....</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 7. Imagen del accidente ferroviario de Viareggio, Italia.</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 8. Imagen del accidente ferroviario de Viareggio, Italia.</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 9. Imagen del accidente ferroviario de Viareggio, Italia.</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 10. Imagen del accidente del Boeing 737 de Aloha Airlines.</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 11. Momento en el que el Prestige comenzó a hundirse.....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 12. Fractura dúctil.</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 13. Fractura frágil.</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 14. Localización de la tensión máxima en la grieta.</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 15. Criterio de diseño en un componente sin defectos.</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 16. Criterio de diseño en un componente fisurado.</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 17. Tipos de geometría de las grietas.....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 18. Modos de propagación de grieta: (a) Modo I, (b) Modo II, (c) Modo III.</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 19. Zonas de rotura por fatiga en un eje ferroviario y proceso seguido en la fractura de un eje de motor.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 20. Reorientación de la grieta en el estadio II de fatiga según el modo I.</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 21. Representación a escala logarítmica de la relación entre la velocidad y la propagación de la grieta a fatiga (da/dN) y la amplitud del factor de intensidad de tensiones (ΔK).....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 22. Ensayo de flexión rotativa.</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 23. Curva de Wholer.</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 24. Diagrama de fatiga S-N.....</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 25. Gráficas S-N para los distintos tipos de esfuerzos.</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 26. Diagrama de fatiga que representa el límite de fatiga corregido.</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 27. Pieza de sección rectangular.</i>	<i>45</i>



<i>Ilustración 28. Gráficas empleadas para el cálculo de concentración de tensiones teóricas en función de los cambios de geometría.</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 29. Gráficas empleadas para el cálculo del factor de concentración de tensiones teóricas en función del tipo de discontinuidad.</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 30. Gráfica para el cálculo del factor de sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y axiales alternantes.</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 31. Gráfica para el cálculo del factor de sensibilidad a las ranuras para cargas de torsión alternantes.</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 32. Pieza con temple superficial en flexión o torsión.</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 33. Diagrama de fatiga de los diferentes criterios.</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 34. Línea de carga en el diagrama de Goodman para vida infinita.</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 35. Curvas de daño correspondientes a dos niveles de tensión aplicada.</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 36. Dispositivos utilizados en la inspección visual.</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 37. Fases del análisis por líquidos penetrantes.</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 38. Defectos obtenidos mediante partículas magnéticas.</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 39. Ensayo de radiografía con equipo portátil.</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 40. Esquema de un equipo de ultrasonido.</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 41. Sección de un transductor o palpador cerámico.</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 42. Inspección mediante cámaras termográficas.</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 43. Ejemplo de equipo para analizar corrientes inducidas.</i>	<i>83</i>
<i>Ilustración 44. Perfil de revolución del eje acotado.</i>	<i>96</i>
<i>Ilustración 45. Revolución de la sección del eje.</i>	<i>97</i>
<i>Ilustración 46. Generación del chaflán.</i>	<i>97</i>
<i>Ilustración 47. Generación del redondeo.</i>	<i>98</i>
<i>Ilustración 48. Mitad del eje.</i>	<i>98</i>
<i>Ilustración 49. Eje completo después de realizar la simetría.</i>	<i>99</i>
<i>Ilustración 50. Sección donde se origina la grieta.</i>	<i>99</i>
<i>Ilustración 51. Geometría de la grieta realizada en el eje.</i>	<i>100</i>
<i>Ilustración 52. Definición y cargas de la mitad del eje.</i>	<i>103</i>
<i>Ilustración 53. Definición y cargas del eje completo.</i>	<i>103</i>
<i>Ilustración 54. Diagrama de tensiones para los dos casos.</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 55. Máximo valor de tensión soportada por el eje.</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 56. Diagrama de deformaciones en los dos casos.</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 57. Estado de las cargas ajustado al eje a estudiar.</i>	<i>106</i>



<i>Ilustración 58. Tensiones y desplazamientos del análisis simple sin refinamiento de malla. ...</i>	<i>108</i>
<i>Ilustración 59. Tensiones y desplazamientos del análisis múltiple sin refinamiento de malla..</i>	<i>108</i>
<i>Ilustración 60. Tensiones y desplazamientos del análisis simple con refinamiento de malla. ...</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 61. Tensiones y desplazamientos del análisis múltiple con refinamiento de malla.</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 62. Ventana de refinado de malla.</i>	<i>110</i>
<i>Ilustración 63. Distribución de tensiones en MPa.....</i>	<i>111</i>
<i>Ilustración 64. Distribución de los desplazamientos en mm.</i>	<i>111</i>
<i>Ilustración 65. Definición de las secciones críticas del eje.....</i>	<i>112</i>
<i>Ilustración 66. Barra de sección circular en flexión con estrechamiento y entalles.</i>	<i>112</i>
<i>Ilustración 67. Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y axiales alternantes.</i>	<i>113</i>
<i>Ilustración 68. Ventana de definición de material en Pro Engineer.</i>	<i>115</i>
<i>Ilustración 69. Gráfica experimental del acero extraída del artículo.</i>	<i>121</i>
<i>Ilustración 70. Diagrama de la metodología a seguir en la resolución del problema.</i>	<i>123</i>
<i>Ilustración 71. Condiciones de contorno del eje para el estudio de precarga.</i>	<i>126</i>
<i>Ilustración 72. Secciones sin restringir.....</i>	<i>126</i>
<i>Ilustración 73. Posición y tipo de carga aplicada sobre el eje para en ensayo de precarga....</i>	<i>126</i>
<i>Ilustración 74. Distribución de tensiones en el eje para una precarga de 170 MPa.....</i>	<i>127</i>
<i>Ilustración 75. Desplazamiento máximo en el eje para una precarga de 170 MPa.....</i>	<i>127</i>
<i>Ilustración 76. Distribución de tensiones en el eje para una precarga de 310 MPa</i>	<i>128</i>
<i>Ilustración 77. Desplazamientos en el eje para una precarga de 310 MPa.</i>	<i>128</i>
<i>Ilustración 78. Gráfica de los valores de precarga aplicados frente a la tensión máxima que aparece.....</i>	<i>130</i>
<i>Ilustración 79. Gráfica de los valores de precarga aplicados frente a los desplazamientos máximos.....</i>	<i>130</i>
<i>Ilustración 80. Ensayo a fatiga para una grieta de 1.1 mm de longitud y 10^8 ciclos de carga.</i>	<i>132</i>
<i>Ilustración 81. Ensayo a fatiga para una grieta de 1.5 mm de longitud y 10^8 ciclos de carga.</i>	<i>132</i>
<i>Ilustración 82. Ensayo a fatiga para una grieta de 4 mm de longitud y 10^8 ciclos de carga....</i>	<i>133</i>
<i>Ilustración 83. Gráfica que muestra la evolución del exponente del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de grieta (mm).....</i>	<i>134</i>
<i>Ilustración 84. Gráfica que representa la evolución del porcentaje de vida a fatiga (%) frente a la longitud de grieta (mm).....</i>	<i>134</i>
<i>Ilustración 85. Ensayo a fatiga para una grieta de 1.9mm de longitud y 10^8 ciclos de carga. .</i>	<i>135</i>
<i>Ilustración 86. Ensayo a fatiga para una grieta de 2.3mm de longitud y 10^8 ciclos de carga. .</i>	<i>136</i>
<i>Ilustración 87. Ensayo a fatiga para una grieta de 10mm de longitud y 10^8 ciclos de carga....</i>	<i>136</i>



<i>Ilustración 88. Ensayo a fatiga para una grieta de 16mm de longitud y 10^8 ciclos de carga...</i>	<i>137</i>
<i>Ilustración 89. Ensayo a fatiga para una grieta de 20mm de longitud y 10^8 ciclos de carga...</i>	<i>137</i>
<i>Ilustración 90. Gráfica que muestra la evolución del exponente del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de grieta (mm).....</i>	<i>139</i>
<i>Ilustración 91. Gráfica que muestra la evolución del exponente del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de grieta (mm).....</i>	<i>139</i>
<i>Ilustración 92. Gráfica que representa la evolución del porcentaje de vida a fatiga (%) frente a la longitud de grieta (mm).....</i>	<i>140</i>
<i>Ilustración 93. Gráfica experimental del acero utilizado en el estudio.</i>	<i>142</i>
<i>Ilustración 94. Gráfica experimental del acero extraída del artículo.</i>	<i>142</i>
<i>Ilustración 95. Ensayo a fatiga para una grieta de 0.5 mm de longitud y $2,34 \cdot 10^5$ ciclos de carga.</i>	<i>143</i>
<i>Ilustración 96. Ensayo a fatiga para una grieta de 2.5 mm de longitud y $1,144 \cdot 10^6$ ciclos de carga.</i>	<i>144</i>
<i>Ilustración 97. Ensayo a fatiga para una grieta de 4mm y $1,352 \cdot 10^6$ ciclos de carga.</i>	<i>144</i>
<i>Ilustración 98. Ensayo a fatiga para una grieta de 6mm y $1,458 \cdot 10^6$ ciclos de carga.</i>	<i>145</i>
<i>Ilustración 99. Gráfica que representa la evolución del exponente de la vida a fatiga frente a la longitud de la grieta.....</i>	<i>146</i>
<i>Ilustración 100. Tanto por uno de vida útil Vs. Longitud de grieta (mm).....</i>	<i>146</i>
<i>Ilustración 101. Tanto por uno de vida útil Vs. Exponente del N° de ciclos (10^N).</i>	<i>147</i>
<i>Ilustración 102. Gráfica que representa la evolución del exponente del número de ciclos (10^N) frente a la longitud de la grieta (mm) teniendo en cuenta las discontinuidades.</i>	<i>150</i>
<i>Ilustración 103. Gráfica que representa la disminución en porcentaje de vida frente a la longitud de la grieta (mm) teniendo en cuenta las discontinuidades.....</i>	<i>150</i>
<i>Ilustración 104. Gráfica que representa la comparación del estudio realizado teniendo en cuenta las discontinuidades (curva roja) y no teniéndolas en cuenta (curva azul).</i>	<i>151</i>
<i>Ilustración 105. Disminución de la vida a fatiga frente al aumento en longitud de la grieta considerando discontinuidades (curva roja) y sin considerar discontinuidades (curva azul). .</i>	<i>152</i>
<i>Ilustración 106. Gráfica que representa la evolución del exponente de vida a fatiga junto con la curva experimental del material.....</i>	<i>153</i>
<i>Ilustración 107. Punto de corte entre la curva de la evolución del exponente de vida a fatiga con la curva experimental del material.....</i>	<i>153</i>
<i>Ilustración 108. Creación de la malla.</i>	<i>155</i>
<i>Ilustración 109. Ventana AutoGEM.....</i>	<i>155</i>



<i>Ilustración 110. Malla generada mediante AutoGEM.</i>	156
<i>Ilustración 111. Refinamiento de malla mediante la herramienta AutoGEM Control.</i>	156
<i>Ilustración 112. Malla refinada.</i>	157
<i>Ilustración 113. Ensayo de fatiga practicado sobre un eje ferroviario al que se le ha practicado una grieta de 0,5 mm de longitud se le ha aplicado un refinamiento de la malla de 15 mm (imagen izquierda) y de 10 mm (Imagen derecha).</i>	158
<i>Ilustración 114. Ensayo de fatiga practicado sobre un eje ferroviario al que se le ha practicado una grieta de 2,5 mm de longitud se le ha aplicado un refinamiento de la malla de 15 mm (imagen izquierda) y de 10 mm (Imagen derecha).</i>	158
<i>Ilustración 115. Ilustración: Ensayo de fatiga practicado sobre un eje ferroviario al que se le ha practicado una grieta de 4 mm de longitud se le ha aplicado un refinamiento de la malla de 15 mm (imagen izquierda) y de 10 mm (Imagen derecha).</i>	159
<i>Ilustración 116. Ilustración: Ensayo de fatiga practicado sobre un eje ferroviario al que se le ha practicado una grieta de 6 mm de longitud se le ha aplicado un refinamiento de la malla de 15 mm (imagen izquierda) y de 10 mm (Imagen derecha).</i>	159
<i>Ilustración 117. Gráfica que representa la evolución del exponente del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de grieta (mm).</i>	160
<i>Ilustración 118. Comparación de las curvas que representan la evolución del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de la grieta (mm), habiendo aplicado un refinamiento de malla de 10 mm (curva azul) y de 15 mm (curva roja).</i>	161
<i>Ilustración 119. Gráfica que representa la evolución del tanto por uno de vida a útil frente a la longitud de grieta (mm).</i>	162
<i>Ilustración 120. Comparación de las curvas que representan el tanto por uno de vida útil frente a la longitud de la grieta (mm) aplicando un refinamiento de malla al eje de 10 mm (curva azul) y de 15 mm (curva roja).</i>	162
<i>Ilustración 121. Curva que muestra la evolución del exponente del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de grieta (mm).</i>	166
<i>Ilustración 122. Gráfica que representa la evolución del exponente de vida a fatiga frente a la longitud de grieta, junto con la curva experimental del material.</i>	167
<i>Ilustración 123. Comparación de las curvas que representan la evolución del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de la grieta (mm), habiendo aplicado un refinamiento de malla de 10 mm (curva azul) y de 15 mm (curva roja).</i>	168
<i>Ilustración 124. Cronograma de los trabajos realizados.</i>	171



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Coeficientes a y b según el acabado superficial.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 2. Factor de confiabilidad Kc.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 3. Relación longitud / ancho de la grieta.</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 4. Resultados de los valores de tensiones (MPa).</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 5: Desplazamientos máximos obtenidos en los dos casos.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 6. Resultados obtenidos tras el estudio de precarga.</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 7. Resultados obtenidos tras el primer estudio de fatiga.</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 8. Resultados obtenidos tras el segundo estudio.</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 9. Tabla con los datos para obtener la curva experimental del acero 25CrMo4.</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 10. Resultados obtenidos.....</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 11. Resultados obtenidos tras el estudio de discontinuidades.....</i>	<i>149</i>
<i>Tabla 12. Resultados obtenidos tras el estudio con refinamiento de malla de 10 mm.</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 13. Desarrollo de costes del proyecto.....</i>	<i>173</i>





1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ÁMBITO O MOTIVACIÓN.

El hecho de que en la actualidad se haya producido un incremento considerable de las instalaciones ferroviarias, a lo largo del territorio español y europeo, debido en gran parte a la cantidad de dinero destinada por la Unión Europea hacia este sector, ha propiciado que cobre especial importancia en los últimos años.

No sólo se ha producido un aumento en las líneas ferroviarias existentes, sino que también la tecnología del sector se ha visto desarrollada de manera destacable. Esto ha hecho posible una mejora de los componentes ferroviarios y de sus propiedades mecánicas, así como la posibilidad de alargar su vida en servicio y reducir las operaciones de reposición debido al aumento del conocimiento obtenido acerca del mantenimiento de ejes y ruedas.

Sin embargo, tanto en los ejes y ruedas de los trenes de alta velocidad como en los de mercancías o en el resto de ellos, a pesar de los avances logrados, sigue existiendo el problema de la fatiga.

Debido a lo anterior se precisa de un mantenimiento exhaustivo en los ejes ferroviarios con el objetivo de detectar posibles signos de fatiga, ya que es enormemente peligrosa dado que no suele presentar indicios de fallo inminente, sino que éste se produce de manera repentina y sin apreciar deformaciones plásticas.



Ilustración 1. Ejes ferroviarios.

Existen varias técnicas para la detección de signos de fatiga, pero las más utilizadas normalmente en el sector ferroviario son los ultrasonidos, los líquidos penetrantes y las partículas magnéticas.

Los ultrasonidos son la técnica más empleada y efectiva, ya que permite la detección de discontinuidades en el interior de los ejes, cosa que no logran las partículas magnéticas de manera total ni los líquidos penetrantes, ya que se tratan de una técnica superficial.



Ilustración 2. Operario realizando una inspección mediante ultrasonidos.

En el caso de los trenes de alta velocidad, el mantenimiento de ejes mediante ensayos no destructivos es más sencillo que en otros trenes como son los de mercancías, ya que los primeros utilizan ejes huecos que permiten la introducción de sondas, facilitando así el ensayo mediante ultrasonidos.

En los trenes de mercancías esta operación no es posible, porque además de tratarse de ejes macizos y de tener que desmontar el eje de su posición de servicio para poder ensayarlo adecuadamente, lo cual puede provocar rayados en la superficie del eje, se añade el problema de tener zonas inaccesibles en las que los ultrasonidos no son totalmente fiables. Esto se debe a que por la geometría de los ejes, la emisión y la recepción del pulso debe hacerse longitudinalmente, quedando partes del eje, como pudieran ser los cambios de sección, fuera del alcance de estas ondas. El hecho de que el mantenimiento de estos ejes sea tan complejo implica equipamientos costosos y personal muy cualificado, lo cual incrementa el coste de manera severa.

En la historia del sector ferroviario existen unos antecedentes importantes en cuanto a accidentes se refiere, y que se deben tener en cuenta.

El primer gran accidente se produjo en 1842 en Versalles, en el que murieron 200 personas, debido al descarrilamiento de un convoy y a su posterior incendio. Se cree que pudo ser causado debido a la rotura de uno de sus ejes.

Más actual fue el ocurrido en 2009 en la localidad italiana de Viareggio, en el que murieron 16 personas a causa de la explosión de gas petróleo licuado que transportaba un tren de mercancías, que como en el caso anterior descarriló, bien por un fallo en uno de sus ejes o por la rotura de uno de los bojes.



Ilustración 3. Accidente ferroviario de Viareggio.

Hasta el momento se han realizado múltiples estudios sobre fatiga en ejes ferroviarios, tanto huecos como macizos, pero no se ha estudiado este fenómeno mediante *Pro Engineer* a través de curvas experimentales.

Debido a todo lo anterior, es necesario realizar un estudio intensivo sobre la fatiga producida en grietas en estos ejes tan problemáticos, utilizando para ello curvas obtenidas experimentalmente, y es por tanto lo que se tratará de hacer en el presente proyecto.



1.2.OBJETIVOS.

El objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera es avanzar en el estudio de la influencia de la geometría y el tamaño de las grietas en la fatiga de un eje ferroviario macizo.

Previo al comienzo de la obtención de resultados es necesario recopilar una importante documentación acerca del fenómeno de fatiga y de los métodos empleados para su estudio y detección. Además se conseguirán artículos científicos sobre fatiga con curvas experimentales que serán de gran ayuda para nuestros análisis pues servirán de contraste.

Además del objetivo principal, entre los objetivos específicos de este proyecto, cabe destacar el desarrollo de una metodología original cuyo fin es la obtención de curvas de fatiga semejantes a las que aparecen en la literatura técnica de fatiga en ejes de ferrocarril, mediante datos empíricos del material cuyas características implementaremos en las simulaciones.

Como complemento adicional, se pretende realizar modificaciones en el tamaño máximo de los elementos de la malla para comprobar si se producirían mejoras respecto a las curvas obtenidas previamente.

Finalmente, también se pretende estudiar a partir de los resultados obtenidos mediante **Pro Engineer** (módulo **Mechanica**) y con la ayuda de la literatura técnica especializada en el tema, la idoneidad del programa a la hora de evaluar la influencia que la fatiga pudiera tener en la vida útil de ejes ferroviarios.

Para este análisis se ha hecho uso el programa de elementos finitos **Pro Engineer** y de sus módulos **Estándar** y **Mechanica**, que permiten el modelado y análisis posterior de los elementos respectivamente. A la hora de tabular y graficar los resultados se ha utilizado el **Microsoft Excel**, que es una conocida aplicación diseñada para el manejo de hojas de cálculo.

Si bien es cierto que en anteriores proyectos ya se habían realizado análisis estáticos con Elementos Finitos de ejes de ferrocarril y se había estimado la vida a fatiga para ejes como el estudiado en este trabajo, realizando variaciones de los parámetros del programa y comparándolos posteriormente.



1.3. ETAPAS DEL PROYECTO.

Con el objetivo de completar la correcta elaboración del presente proyecto, se establecieron una serie de etapas que se explican a continuación:

1. Planteamiento de los objetivos del Proyecto de Fin de Carrera: esta etapa consistió en una serie de reuniones con los tutores en la que se fijaron los objetivos principales y se marcaron unas pautas de trabajo.
2. Estudio de la teoría y manuales relacionados con los objetivos del proyecto: en esta etapa se recopiló toda la información de utilidad con la finalidad de documentarse acerca de los objetivos a lograr.

Para ello, se hizo un estudio de la historia de los fallos de fatiga, en el que se estudiaron todos los accidentes sucedidos, comenzando con el accidente de Versailles (Francia, 1842), hasta el sucedido en la localidad de Viareggio (Italia, 2009).

También se ha estudiado la evolución que ha ido sucediendo en lo que se refiere al análisis de elementos a fatiga.

A esta etapa también se le atribuye la recopilación de planos, documentación y normativa utilizada a lo largo del presente proyecto.

Por último, se ha realizado un estudio del estado del arte del tema a tratar, en el que se ha recopilado todo tipo de documentación relacionada con la fractura y fatiga, además de un estudio del rodaje en ejes ferroviario.

3. Estudio y aprendizaje del software de diseño Pro/ENGINEER: el proyecto se realizó haciendo uso del software de diseño mecánico Pro/ENGINEER Wildfire 5.0. Previamente a la utilización del mismo, hubo que familiarizarse a partir de la lectura y comprensión de los manuales existentes, además de la realización de ejemplos didácticos incluidos en dichos manuales.
4. Modelado del eje: la modelización del eje ferroviario se realizó a partir de los planos obtenidos de proyectos anteriores al actual.
5. Modelado de las grietas: A partir de esta etapa se define la geometría y la localización de la grieta y finalmente se procede al modelado de la misma. Además, en esta etapa se establece que la grieta se originará en la sección más crítica del eje.
6. Diseño de la metodología de los análisis: para la consecución de los objetivos principales anteriormente explicados, se diseñó una metodología para cada análisis en la que se expone, para cada estudio a realizar, las suposiciones realizadas, las



condiciones de contorno que se utilizarán y el objetivo que se busca en cada estudio.

7. Realización de los análisis: por medio del software Pro/ENGINEER se realizarán todos los análisis y simulaciones necesarias para cada estudio.

Los resultados obtenidos se procesarán en la hoja de cálculo proporcionada por el programa Microsoft Office Excel 2007.

8. Interpretación de los resultados: una vez obtenidos y procesados obtenidos en los análisis precedentes, se interpretarán y se concluirá cada uno de los estudios.
9. Realización de la memoria: por último, una vez cumplidas todas las etapas anteriores, se pasó a la realización del documento teórico que se expone a continuación.



1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.

El contenido del trabajo se ha dividido en 5 bloques, y a su vez en 13 capítulos.

El primer bloque o bloque de introducción se compone del capítulo 1, y en el cual se detallan la motivación, los objetivos, las etapas y los contenidos del proyecto.

En el segundo bloque se ha hecho uso de los capítulos 2, 3, 4, 5 y 6, en ellos se describe la teoría sobre fatiga, fractura y ensayos no destructivos, que son fundamentos que se utilizarán a lo largo del proyecto.

El tercer bloque consiste en el planteamiento y resolución del problema, y está formado por los capítulos 7, 8 y 9. Se describe el problema a resolver y la metodología utilizada en cada estudio.

El siguiente bloque es el de resultados, y está compuesto por el capítulo 10. En él se detallan todos los estudios realizados y sus correspondientes resultados.

Por último, el quinto bloque recoge los capítulos 10, 11, 12, 13 y 14, en los cuales se describen las conclusiones obtenidas, los posibles trabajos futuros, el presupuesto, la bibliografía y los anexos.



2. FENÓMENOS DE FATIGA



2. FENÓMENOS DE FATIGA.

2.1. INTRODUCCIÓN.

La mayoría de los sistemas mecánicos están sometidos durante su funcionamiento a cargas variables con el tiempo, con valores de tensión inferiores a los que suceden en casos de cargas de amplitud constante. La aplicación continuada de estas cargas puede llevar a la aparición de pequeñas grietas en el material, generalmente en la superficie, que progresan a través de él, reduciendo la capacidad portante del componente, pudiendo desembocar en su fractura. Dicho fenómeno se conoce como fallo por fatiga y es el responsable de más del 50% de los fallos en componentes mecánicos.

Por tanto, una de las consideraciones importantes en el diseño de tales componentes es la vida esperada a fatiga.

Es definido de una manera más general por las normativas ASTM como “el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un punto del material sujeto a tensiones y deformaciones de amplitudes variables y que produce grietas que conducen a una fractura total tras un número de ciclos”.

Las roturas por fatiga son especialmente peligrosas porque no suelen presentar indicios de fallo inminente, sino que éste se produce de modo repentino y sin observar deformaciones plásticas de conjunto, además la rotura se produce bajo cargas que están aún dentro del período elástico del comportamiento del material, lo que a lo largo de la historia ha provocado importantes accidentes.

2.2. HISTORIA DE LOS FALLOS DE FATIGA.

La fatiga estructural es un concepto prácticamente reducido a los metales, por lo que los primeros fallos debido a fatiga se encuentran en los primeros años de la revolución industrial, cuando los materiales metálicos comenzaron a ser utilizados de forma generalizada.

El primer gran accidente en el sector ferroviario se produjo en 1842 en Versalles, Francia, en el que murieron 200 personas entre las que se encontraban personas de la realeza francesa, debido al descarrilamiento de un convoy y al posterior incendio del mismo, debido al carbón que contenía el vagón delantero. Se cree que pudo ser causado por la rotura de uno de sus ejes.



Ilustración 4. Pintura del accidente ferroviario producido en Versailles en 1842.

Se estima que en Gran Bretaña morían unas 200 personas al año entre 1860 y 1870 debido a accidentes en ferrocarril, siendo la mayoría motivados por problemas de fatiga en los ejes de las ruedas.

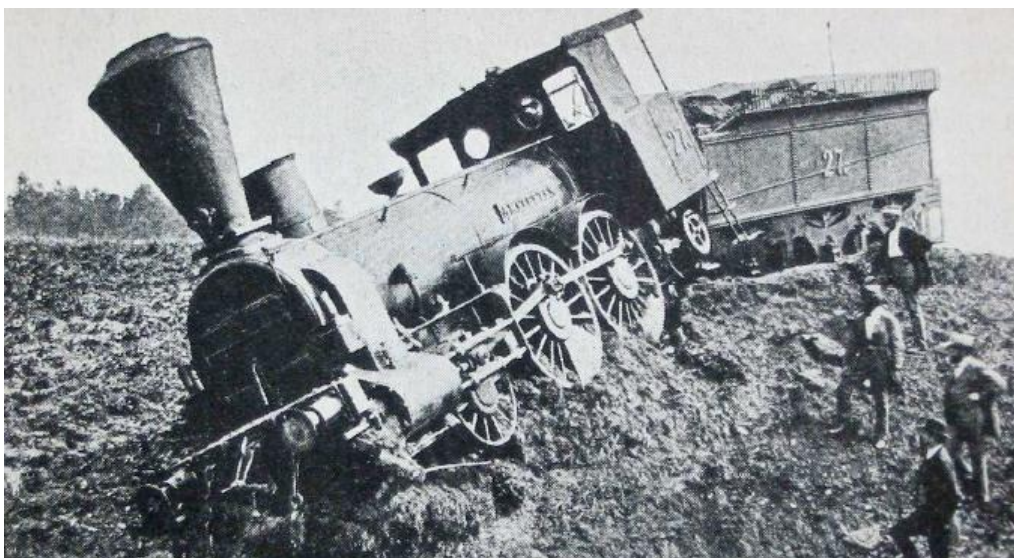


Ilustración 5. Accidente ferroviario en Amstetten debido al fallo de los ejes de la locomotora.

En Marzo de 1996 ocurrió un accidente en Rickerscote, Stafford, en el que un tren de mercancías descarriló debido a la fractura repentina de uno de sus ejes. Los vagones descarrilados salieron despedidos ocupando la vía adyacente, produciendo que un tren que circulaba en dirección contraria impactase contra éstos.

El conductor de éste último tren, no tuvo tiempo para frenar, y la fuerza de la colisión hizo girar la locomotora y la catapultó hacia un terraplén.

Murió una persona y resultaron heridas 22 personas, incluido el conductor del segundo tren.



Ilustración 6. Imagen del accidente ferroviario de Rickerscote, Stafford.

De mayor actualidad y gravedad es el accidente que se produjo en Junio de 2009 en la localidad italiana de Viareggio, donde un tren de mercancías cargado con cisternas de gas petróleo licuado (GLP) que se disponía a entrar en la estación descarriló y explotó.

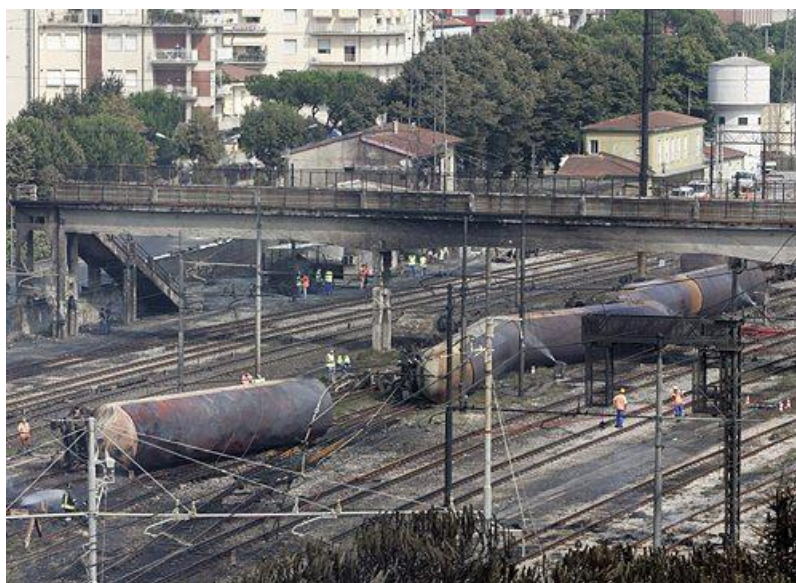


Ilustración 7. Imagen del accidente ferroviario de Viareggio, Italia.

Las primeras hipótesis apuntaron a que el accidente se debió a la rotura de uno de los bojes de un vagón cisterna del convoy, lo que hizo que éste volcara y saliera el líquido, que explotó a causa de una chispa.

Otras fuentes concretaron que el desastre pudo ser debido a la rotura de un eje delantero de un vagón, que se quebró al pasar el tren, de 14 vagones, por la estación.

Este accidente, además de ser uno de los más graves de la historia ferroviaria italiana, causó la muerte a una quincena de personas y dejó a otras 40 heridas de gravedad.



Ilustración 8. Imagen del accidente ferroviario de Viareggio, Italia.



Ilustración 9. Imagen del accidente ferroviario de Viareggio, Italia.

Tanto en el ámbito de la aeronáutica o en el naval, como en el ferroviario, también se da este fenómeno. En el primero por ejemplo, cabe destacar el vuelo de los hermanos Wright, el cual tuvo que ser pospuesto ya que aparecieron grietas en el eje de la hélice, motivadas éstas por la fatiga. Posiblemente fue el primer caso de fatiga en aviación.

Otros accidentes debido a este fenómeno son los que se dieron alrededor de los años 50 en los aviones *Comet*. Estos problemas concluyeron con una serie de accidentes cuya consecuencia fue la retirada del certificado de aeronavegabilidad y el hundimiento de la empresa propietaria del modelo en cuestión.

Una marca de la competencia, *Boeing*, principal beneficiado de los problemas en los *Comet*, tampoco se libró de la fatiga, y en 1988 en Hawái, un *Boeing 737* de la compañía *Aloha Airlines*, perdió gran parte del fuselaje superior volando a unos 24.000 pies de altitud.

Se atribuyó la causa del accidente a la aparición de grietas múltiples en la hilera de remaches del fuselaje, que se unieron, formando así, una grieta de grandes dimensiones, que fue lo que provocó el siniestro. El avión, que fue diseñado para hacer 75.000 vuelos, llevaba 89.090 realizados.



Ilustración 10. Imagen del accidente del Boeing 737 de Aloha Airlines.

Una vez que se tuvo conciencia de que los errores no eran producidos por cargas excesivas en la estructura, comenzaron los estudios para averiguar cuál era el proceso por el cual se producían estos fallos.

Debido a que ocurrió en nuestro país y por su relativa actualidad, cabe destacar el caso del “Prestige”, que causó tal impacto en el medioambiente marino de la zona, y en el que se debatió si la causa de su hundimiento pudo ser una vez más la fatiga.



Ilustración 11. Momento en el que el Prestige comenzó a hundirse.

2.3. *HISTORIA DEL ANÁLISIS DE FATIGA.*

Debido a los accidentes que se producían, a finales del siglo XIX se comenzó a analizar sistemáticamente este aspecto del comportamiento de los materiales.

Los primeros trabajos relacionados con la fatiga se atribuyen al ingeniero de minas alemán W. Albert, quien en 1829 realizó ensayos sometiendo a cargas y descargas sucesivas eslabones de cadenas de elevadores. No obstante, el término fatiga para denominar el fallo de materiales debido a cargas repetidas fue introducido más tarde.

El interés en el estudio de este fenómeno comenzó a crecer con el aumento del uso de estructuras férreas, particularmente puentes de ferrocarril. El primer estudio en fatiga de metales se inició en 1842 a raíz de un accidente de ferrocarril ocurrido en Versalles (Francia) en el que murieron entre 1500 y 1800 personas.

Ya en 1843, W.J.M. Rankine, ingeniero y físico escocés que más tarde sería famoso por sus contribuciones a la ingeniería mecánica, reconoció las características distintivas de la fractura por fatiga e hizo notar el peligro de los concentradores de tensión en los componentes de máquinas y en los ejes de ferrocarriles. Esta teoría la formuló mientras trabajó con su padre en la Edinburgh & Dalkeith Railway.



Estas teorías sirvieron al ingeniero alemán August Wöhler, el que durante las décadas de 1850 y 1860 realizó la primera investigación sistemática del fenómeno de fatiga. Wöhler trabajó en la industria del ferrocarril y realizó numerosos ensayos de laboratorio sometiendo probetas a esfuerzos alternativos. Con estos ensayos introdujo el concepto de límite de fatiga y el diagrama S-N, curva que se continúa llamando también curva de Wöhler en su honor.

En 1874, el ingeniero alemán H. Gerber comenzó a desarrollar métodos para el diseño a fatiga. Su contribución incluyó el desarrollo de métodos para el cálculo de la vida a fatiga para diferentes niveles medios de la tensión cíclica. Problemas similares fueron abordados por Goodman y Soderberg.

La idea de que el límite elástico de los metales con cargas cíclicas podía ser diferente a la observada en la deformación mono tónica fue popularizada por Bauschinger en 1886, quien confirmó muchos de los resultados anteriores de Wöhler.

Ya en 1903, Ewings y Humphrey observaron que si se supera el límite de proporcionalidad con carga estática, aparece deslizamiento en algunos planos cristalinos del material y por ello deformación. Pero también observaron que surgen líneas de deslizamiento para un valor del esfuerzo máximo muy por debajo del límite de proporcionalidad, y que al aumentar el esfuerzo, aumenta el número de líneas de deslizamiento y su tamaño hasta producirse la rotura de algunos cristales de los que se compone el material. Este proceso es el que conduce finalmente a la rotura del material.

Aun cuando la teoría de Ewings y Humphrey supone un notable avance respecto a lo que hasta entonces se conocía sobre la fatiga, presenta algunas lagunas. Por ejemplo la falta de explicación de la ausencia de rotura de las probetas y piezas por debajo de un cierto umbral de tensión, como observó Wöhler.

Durante la primera mitad del siglo XX se obtuvieron gran cantidad de datos experimentales relacionando la resistencia a fatiga con factores tales como la geometría y tamaño de las piezas, condiciones ambientales, acabado superficial, estructura metalográfica, etc. Las investigaciones en este periodo permitieron el desarrollo de los modelos de daño acumulado para predecir el fallo por fatiga. Es importante destacar a Palmgren y a Miner.

Por el año 1957 Irwin mostró en sus estudios que la amplitud de la singularidad en tensiones delante de una grieta podía ser expresada en términos de una cantidad conocida como factor de intensidad de tensiones, K. Con el desarrollo de la mecánica de la fractura elástica lineal se intentó caracterizar el crecimiento de las grietas de fatiga también en términos del factor de intensidad de tensiones.



Paris y Erdogan, fueron los primeros en sugerir que el incremento de longitud de grieta por ciclo, da/dN , podía relacionarse con el rango del factor de intensidad de tensiones, ΔK , bajo cargas de amplitud constante.

Con la aplicación de los conceptos de mecánica de fractura al fallo por fatiga, tomaron un interés creciente el estudio de los mecanismos de crecimiento subcrítico de grieta. Modelos conceptuales y cuantitativos fueron desarrollados para obtener la resistencia de los materiales al crecimiento de grietas. Junto con estos estudios, creció el interés por comprender el proceso por el que el factor de intensidad de tensiones podía verse alterado con el avance de la grieta.

En este aspecto, cabe destacar a Elber, quien en 1970, mostró que la grieta puede permanecer cerrada incluso cuando está sometida a tensiones cíclicas de tracción debido a la plastificación producida en el borde de la grieta.

En las últimas décadas, con el desarrollo y creación de máquinas más sofisticadas, comienza la realización de ensayos con cargas complejas (amplitud variable).

Durante el crecimiento de una grieta con cargas de amplitud variable se produce lo que se denomina efecto de secuencia o de interacción debido a la irregularidad de la carga, el cual fue puesto de manifiesto en la década de los 60.

Por tanto, se puede concluir que, a pesar del enorme esfuerzo invertido durante los últimos 180 años, la disponibilidad de máquinas cada vez más complejas, de técnicas de medición y detección de grietas cada vez más pequeñas y procedimientos de cálculo más avanzados, aún no se posee un conocimiento completo del fenómeno de la fatiga de los metales.

Sin embargo, a pesar no poseer el conocimiento completo sobre el fenómeno, se puede afirmar que se ha conseguido obtener un gran desarrollo en el cálculo de la vida a fatiga de elementos mecánicos y un aumento de la fiabilidad de los mismos.

2.4. ESTADO DEL ARTE.

En lo que se refiere a la industria ferroviaria, los ejes de ferrocarril son componentes críticos en cuanto a seguridad se refiere.

Son uno de los primeros elementos sujetos a alto número de ciclos de carga repetitiva, y debido a la rotación, cada vez que el eje gira, un punto de la superficie pasa de estar en un estado de compresión a estar en un estado de tracción de igual magnitud.

Los fallos debido a fatiga en ejes ferroviarios son muy poco comunes. Por ejemplo, en Reino Unido, durante los últimos 25 años ha habido una media de 1,6 fallos de ejes por año, con una población de 180.000 ejes en servicio.



A pesar de que los ejes son muy seguros estadísticamente, los ejes se inspeccionan a frecuencias regulares usando métodos de inspección no destructiva, tales como inspección por ultrasonidos o partículas magnéticas.

Las inspecciones por ultrasonidos se emplean con relativa frecuencia y esto implica pasar una onda de ultrasonidos por el eje y después medir las reflexiones. Los resultados se comparan con una norma de reflexión estándar de un eje en plenas condiciones y se evalúan las desviaciones.

El procedimiento a seguir para determinar la frecuencia de inspección implica calcular el tiempo que transcurre desde que se detecta una posible fisura hasta que crece y se produce el fallo del componente. El intervalo de inspección debe ser menor que éste y usualmente suele ser una fracción de este tiempo que permite detectar la fisura en la siguiente inspección, la cual podría haber sido omitida previamente.

La probabilidad de que en un lote de ejes exista, aunque sólo sea un eje defectuoso, es bastante baja, debido a la naturaleza del problema. Los operadores de los equipos de detección presentan un gran número de ejes examinados con un porcentaje muy bajo de defectos.

Existen factores humanos añadidos que deben tenerse en cuenta y que ponen en duda la seguridad de las inspecciones de ultrasonidos. Estos factores cobran un interés especial cuando se trata de determinar los intervalos de inspección.

Además, debido a que el examen de ultrasonidos requiere la extracción de la caja que recubre el eje, se incrementa el riesgo, cabiendo la posibilidad de deterioro superficial del eje al re-ensamblar la caja en su posición inicial una vez finalizada la inspección, o cuando se realoje el cojinete en su posición.

Debido a todo esto, el beneficio de la seguridad de las inspecciones de ultrasonidos puede ser contrarrestado por el riesgo adicional introducido por los procedimientos explicados durante la inspección.

Las inspecciones más sensibles se realizan mediante partículas magnéticas, y se llevan a cabo en las revisiones de las ruedas principales, en las que las propias ruedas o los discos de frenos son extraídos del eje, lo cual permite un examen detallado de la superficie del mismo.

Como resumen, se puede concretar, que debido a que los ejes ferroviarios tienen un carácter crítico en la seguridad, se ha desarrollado una considerable experiencia durante los años en el diseño, gestión y operación de ejes. A pesar de la alta fiabilidad que se ha obtenido en los ejes, sigue existiendo un continuo aunque pequeño número de fallos, por tanto es necesario comprender bien los factores que afectan a la probabilidad de fallo del eje.



3. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA



3. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA.

3.1. INTRODUCCIÓN.

La rotura de un material, en las condiciones más simples, es la separación de un cuerpo en dos o más partes en respuesta a una tensión máxima aplicada (es decir, constante o cambiando ligeramente con el tiempo) y a temperaturas que son relativamente bajas en comparación con la temperatura de fusión del material. La forma más sencilla de tensión aplicada sería una tracción uniaxial y uniforme.

La fractura se inicia siempre en defectos presentes en el material. Dichos defectos pueden ser de dimensiones y formas muy diferentes de un material a otro.

3.2. ANÁLISIS DE FALLOS.

El análisis de fallos en servicio tiene gran importancia, ya que permite alcanzar un conocimiento real de las posibilidades que presenta cada material para alcanzar determinadas aplicaciones. Analizar los fallos en servicio es muy complejo, pues en muchos casos las circunstancias por las que se producen son ajenas al componente en el que ha tenido lugar el fallo.

3.3. CLASIFICACIÓN DE LOS FALLOS.

Existe una amplia gama de clasificaciones de fallo, de manera que todos entren dentro de algún grupo y eso ayude a analizarlos correctamente. A continuación se presentan los que tienen que ver con los distintos tipos de sollicitaciones mecánicas que se dan durante el tiempo en servicio y con el tipo de fractura que se observa en el componente.

3.3.1. SEGÚN LA SOLICITACIÓN.

Los fallos se pueden clasificar según el modo de aplicación de la carga y el tipo de sollicitación que los provocan. La carga puede ser estática o variable principalmente:

- En caso de carga estática, el componente puede encontrarse bajo tracción, compresión, torsión, cizalladura o cualquiera de las posibles combinaciones entre ellas. Las fracturas que se producen con este tipo de cargas también son estáticas, viéndose muy afectadas por la temperatura alcanzada y por el tiempo de servicio.
- En el caso de carga variable, si además esta se repite cíclicamente, la fractura será dinámica y se medirá el número de ciclos en el que varían las cargas. Si se combinan de manera necesaria la carga, el tiempo y la temperatura, se puede llegar a producir la fluencia del material.



3.3.2. SEGÚN EL TIPO DE FRACTURA.

Otra posible clasificación corresponde al tipo de fractura, que puede presentar órdenes de magnitud diferentes: nivel atómico, nivel microscópico y nivel macroscópico.

- A **nivel microscópico**, las fracturas se pueden clasificar en dos grandes grupos: transcrystalinas e intercrystalinas. La fractura intercrystalina consiste básicamente en la descohesión entre granos a través de sus bordes; previamente a la fractura, además, los granos pueden experimentar microdeformación plástica en sus superficies. Las fracturas transcrystalinas, por su parte, se pueden dividir en una serie de grupos que dependen de los distintos mecanismos de fractura o del aspecto morfológico que presenta la propia superficie de rotura que, a su vez, también depende del tipo de esfuerzos experimentados o de las características intrínsecas del material.
- Finalmente, a **nivel macroscópico**, se pueden distinguir los siguientes grupos de fracturas:
 - *Dúctil por carga estática*: Este tipo de fractura implica deformación plástica por deslizamiento, produciéndose gran absorción de energía y elevado alargamiento. En función del tipo de carga puede ser de tracción, de flexión, de cizalladura o de torsión.
 - *Frágil por carga estática*: Se produce por el crecimiento de grietas en planos normales a la dirección de la carga caracterizándose por presentar escasa deformación plástica.
 - *Frágil por carga estática mantenida*: Se distingue entre corrosión-tensión, fragilización por hidrógeno, fragilización por metal líquido y fragilización por irradiación neutrónica.
 - *Fatiga*: Se dividen en alto y bajo número de ciclos cuando sólo se tiene en cuenta el efecto mecánico; y en fatiga-corrosión y fatiga-temperatura, cuando se combinan esfuerzos mecánicos que tienen lugar por fatiga con la corrosión o temperatura.

3.4. TIPOS DE FRACTURA.

Según la capacidad del material para deformarse plásticamente antes de romperse, las roturas se clasifican en dos categorías: dúctiles y frágiles. Los materiales dúctiles exhiben normalmente una deformación plástica sustancial antes de la fractura. Por el contrario, en la rotura frágil no existe apenas deformación plástica durante el proceso de rotura. Las partes resultantes después de la rotura frágil pueden juntarse de nuevo y reproducir completamente la geometría inicial de la probeta. Esto no es posible cuando la rotura es dúctil.

3.4.1. FRÁCTURA DÚCTIL.

La fractura dúctil de un material tiene lugar después de una intensa deformación plástica.

Si consideramos una probeta redonda y se aplica un esfuerzo a la probeta tal que exceda su resistencia máxima a la tensión, y se mantiene suficiente tiempo, la probeta se fracturará. La fractura dúctil comienza con la formación de un cuello y la formación de cavidades dentro de la zona de estrangulamiento. Luego las cavidades se fusionan en una grieta en el centro de la muestra y se propaga hacia la superficie en dirección perpendicular a la tensión aplicada. Cuando se acerca a la superficie, la grieta cambia su dirección a 45° con respecto al eje de tensión y resulta una fractura de cono y embudo.

En la práctica, las fracturas dúctiles son menos frecuentes que las frágiles, y su principal causa es el exceso de carga aplicado a la pieza, que puede ocurrir como resultado de un diseño erróneo, una fabricación inadecuada o un abuso (someter a la pieza a niveles de carga por encima del soportado).

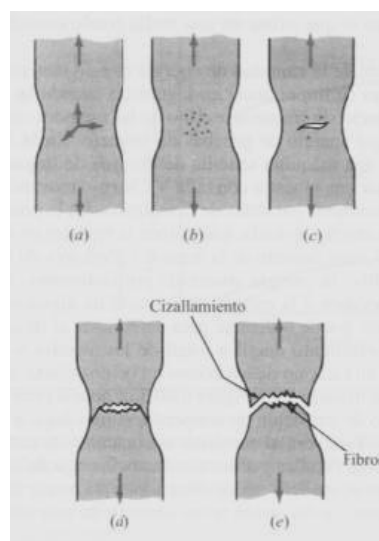


Ilustración 12. Fractura dúctil.

3.4.2. FRACTURA FRÁGIL.

La fractura frágil ocurre sin deformación plástica apreciable y por propagación rápida de una grieta. La dirección del movimiento de la grieta es perpendicular a la dirección de la tensión aplicada y produce una superficie de fractura relativamente plana.

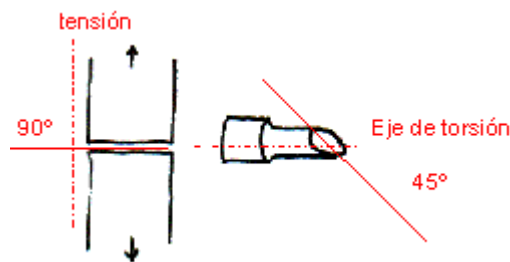


Ilustración 13. Fractura frágil.

En la mayoría de los materiales cristalinos frágiles, la propagación de la grieta se debe a la rotura sucesiva de enlaces atómicos a lo largo de planos cristalográficos, proceso que se denomina **descohesión** o **clivaje**. Este tipo de fractura se dice que es **transgranular** o **transcristalina**, debido a que las fisuras pasan a través de los granos. El proceso de clivaje implica fracturas transgranulares a lo largo de planos cristalográficos específicos.

En algunos materiales, la propagación de la grieta ocurre a lo largo de los bordes de grano. Esta fractura se denomina **intergranular**, y se produce normalmente como consecuencia de algún fenómeno que ha debilitado o fragilizado los bordes de grano, tal como:

- La precipitación de una fase frágil a lo largo de los bordes de grano.
- La fragilización por Hidrógeno.
- La fragilización por metal líquido.
- La fisuración asistida por el medio ambiente.
- La corrosión intergranular
- La cavitación y fisuración a lo largo de límites de grano a altas temperaturas. A temperaturas elevadas, uno de los mecanismos de deformación es el deslizamiento de los bordes de grano, en los cuales se forman cavidades.



3.5. GRIETAS POR FATIGA.

3.5.1. INICIACIÓN DE GRIETAS POR FATIGA.

Una grieta de fatiga se puede iniciar en cualquier lugar de un componente donde el esfuerzo y la deformación sean lo suficientemente altos para causar un deslizamiento sean lo suficientemente altos para causar un deslizamiento alterno continuo, luego sigue un período de propagación, también por deslizamiento alterno, hasta cuando la grieta alcanza un tamaño crítico; en consecuencia, la vida de fatiga de un componente estructural por iniciación y propagación de una grieta es igual a la suma de la fase de iniciación y de la fase de propagación. Cuando un componente contiene una imperfección tipo grieta se reduce o elimina la vida de la fase de iniciación de grieta.

La presencia de una grieta altera el campo de esfuerzos en un componente. Hasta cuando una grieta no tiene un tamaño lo suficientemente grande para perturbar el campo de esfuerzo se emplea los esfuerzos y las deformaciones en el sitio donde se va a desarrollar una grieta para estimar la vida de iniciación. Esto se hace con base en el historial de carga, geometría del componente y comportamiento de fatiga del material.

Frecuentemente una grieta de fatiga se inicia en una discontinuidad geométrica (entalla) que causa un aumento local de esfuerzo y deformación, de modo que se tiene un sitio donde ocurre deformación plástica el cual actúa como un núcleo de iniciación de una grieta por fatiga. Neuber y Topper han establecido.

$$K_f^2 \Delta S \Delta e = \Delta \sigma \Delta \epsilon$$

Donde K_f es el factor de entalla en fatiga, el cual se define como:

$$K_f = \frac{\text{esfuerzo sin entalla}}{\text{esfuerzo con entalla}}$$

ΔS y Δe son respectivamente el intervalo de esfuerzo y de deformación nominal en un ciclo de carga.

$\Delta \sigma$ y $\Delta \epsilon$ son respectivamente el intervalo de esfuerzo y de deformación local en un ciclo de carga en la raíz de una entalla.

El valor de K_f depende de la geometría del material, del acabado superficial y gradiente de esfuerzo en entalla.



3.5.2. PROPAGACIÓN DE GRIETAS POR FATIGA.

Para que una grieta avance de forma estable y continua bajo condiciones de deformación plana, se precisa de una inyección de dislocaciones que permitan acomodamientos en los desplazamientos cortantes en el frente de grieta, a $\pm 45^\circ$ del plano de la grieta, dando lugar a la formación de estriaciones, entendiéndose por tales las marcas regulares que pueden observarse en la superficie de fractura por fatiga, generalmente paralelas al frente de grieta y que representan las posiciones sucesivas del frente de grieta durante la propagación de la misma.

Uno de los modelos de crecimiento, relacionados por Tomkins, permite realizar las siguientes consideraciones:

- Suponiendo que el inicio de la grieta ya ha tenido lugar y partiendo de un estado de compresión, la aplicación de una pequeña tensión de tracción origina la formación de bandas de flujo plástico localizada a $\pm 45^\circ$ del plano de la grieta.
- Con el incremento de la apertura del frente de la grieta se forma una nueva superficie por descohesión cortante, que a su vez contribuye a la mencionada apertura de la grieta. Al mismo tiempo, se incrementa el ancho de las bandas de flujo, propagándose la deformación por los flancos de la grieta.
- Al disminuir la carga aplicada tiene lugar un proceso de flujo plástico inverso y como consecuencia de que los cambios geométricos del frente de la grieta no son totalmente reversibles, se forma una inestabilidad local de compresión, seguida de una estriación. Este mecanismo se produce durante el proceso de cierre de la grieta, incluso aunque la tensión nominal continúe siendo de tracción.
- En el caso de aperturas grandes de la grieta, se pueden formar nuevas bandas de flujo plástico. Igualmente, se pueden formar estriaciones múltiples, que a veces están organizadas en forma de pequeñas estriaciones contenidas dentro de otras mayores.

Cuando las aperturas de la grieta son pequeñas, pueden ser precisos varios ciclos de carga para crear una nueva superficie del frente y que se produzca la inestabilidad. Por lo tanto, el espaciado de las estriaciones refleja la apertura del frente de la grieta y la velocidad de crecimiento, o sea, el incremento de la superficie de la grieta durante cada ciclo, es una fracción de dicha apertura. En los procesos de análisis cuantitativo de fallos hay que tener en cuenta los siguientes hechos:

- Las estriaciones son manifestaciones de deformación plástica localizada en el frente de la grieta y por lo tanto no representan necesariamente el avance por ciclo de grieta.



- Las estriaciones no siempre son indicativas de la aplicación de un ciclo simple de fatiga.

Si los materiales son de alta resistencia, su capacidad limitada de deformación puede originar agrietamientos secundarios en las bandas de flujo plástico y, en el caso de materiales con resistencia dispersa, lograda con una importante fracción en volumen de partículas de segunda fase, es habitual encontrar contribuciones importantes a la velocidad de crecimiento que estén originadas por la coalescencia de cavidades alrededor de estas partículas. En estos casos, la velocidad de crecimiento puede verse afectada por modos estáticos de fractura.

La contribución de diferentes micro-mecanismos a la propagación de las grietas por fatiga muestra tres regiones de diferentes características:

- **Región A:** es una región umbral, de comportamiento no continuo, altamente influenciada por la microestructura, por la tensión media y por las condiciones ambientales.
- **Región B:** es una región que representa un comportamiento estable y continuo de la propagación de grietas por fatiga, escasamente influenciado por la microestructura, tensión media y espesor, y con una influencia variable del medio ambiente. Esta región se caracteriza por el hecho de que las cargas son lo suficientemente grandes como para producir una zona plástica en el frente de grieta que incluye muchos granos.
- **Región C:** es una región con un comportamiento casi continuo en la propagación de la grieta por fatiga, pero influenciado en cierta medida por modos estáticos de fractura. La influencia de la microestructura, tensión media y espesor es muy grande, mientras que la influencia ambiental es escasa.
- Teoría del avance de grieta por fatiga.

Existen dos utilizaciones diferentes de las teorías de propagación de grietas: las leyes de predicción y las teorías de predicción basadas en un modelo de propagación.

Entre las leyes de predicción, la más conocida y utilizada es la de Paris-Erdogan, según la cual la tasa de propagación por ciclo, da/dN viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m$$



Donde C y m son constantes del material, ΔK es el incremento del factor de intensidad de tensiones, que depende del tamaño de la grieta y del rango de tensiones aplicado. Suponiendo que el tamaño de la grieta crece de forma continua, el valor de ΔK decrecerá también de forma continua.

Casi todos los datos disponibles de propagación de grietas por fatiga, para una gran cantidad de materiales ya temperaturas bajas, intermedias y en algunos casos altas, se representan en gráficos que utilizan una doble escala logarítmica, con lo que la ley de Paris-Erdogan se convierte en una línea recta. La ley no es válida por encima o por debajo de ciertos valores de ΔK , por ejemplo, la grieta no se propaga por debajo de un valor umbral del rango del factor de intensificación de tensiones. Del mismo modo, el crecimiento se acelera cuando esta próxima la fractura final, que ocurre cuando se alcanza un valor crítico ΔK_c .

Las teorías de predicción pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- Teorías basadas en la acumulación de daños o de deformación en el frente de grieta.
- Teorías que establecen una apertura-desplazamiento cíclico del frente de grieta como parámetro de avance.
- Teorías que establecen el criterio de avance en función de un equilibrio de energía en el frente de grieta.

De acuerdo con el primero de estos grupos, el avance de la grieta se produce cuando el daño acumulado delante de la grieta alcanza una condición de fallo. Han surgido así diferentes teorías, basadas en diferentes modelos; todas ellas llevan casi invariablemente a valores de $M = 4$. Las teorías basadas en la apertura-desplazamiento del frente de la grieta modelizan los cambios de geometría que ocurren en el frente de la grieta, identificando la parte de la nueva superficie de grieta, creada en cada ciclo, como irreversible. Estas teorías llevan a un valor de $m = 2$ para condiciones de deformación plana. El tercer y más reciente grupo de teorías de la propagación de grietas por fatiga se basa en los criterios de equilibrio de energía, desarrollados a partir de la teoría de Griffiths. Estas teorías llevan a expresiones complejas que, en forma simplificada, dan como resultado valores de $m = 4$ y a veces de $m = 2$.

3.6. DEFECTOS Y CONCENTRACIÓN DE TENSIONES.

La fractura frágil de materiales normalmente dúctiles, ha puesto de manifiesto la necesidad de un mejor conocimiento de la Mecánica de la Fractura.

El conocimiento adquirido permite la cuantificación de la relación entre las propiedades de los materiales, los niveles de tensión, la presencia de defectos que producen grietas y los mecanismos de propagación de éstas.

3.6.1. CONCENTRACIÓN DE TENSIONES.

La resistencia a la fractura experimental de la mayoría de los materiales de ingeniería es normalmente entre 10 y 100 veces menor que el valor teórico.

En la década de los años veinte, A. A. Griffith propuso que esta discrepancia entre la resistencia cohesiva teórica y experimental podía ser explicada por la presencia de grietas microscópicas.

Estos defectos afectan a la resistencia a la fractura debido a que una tensión aplicada puede ser amplificada o centrada en la punta del defecto, en un grado que depende de la orientación de la grieta y de la geometría. Este fenómeno se aprecia en la ilustración anterior, donde se muestra el perfil de tensiones a través de la sección que contiene una grieta. Tal como se ilustra, la magnitud de la tensión localizada disminuye con la distancia a la punta de la grieta.

Si se supone que la grieta tiene una forma elíptica y está orientada con su eje mayor perpendicular a la tensión aplicada (σ_0), la tensión máxima en el extremo de la grieta, σ_m , puede ser aproximada mediante la ecuación:

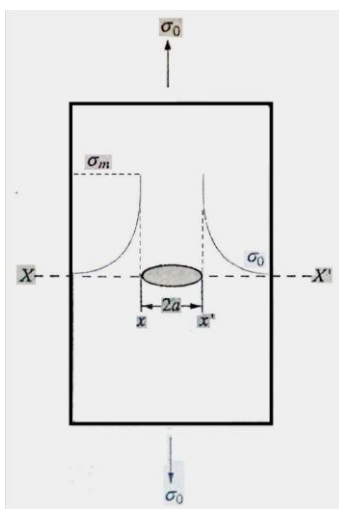


Ilustración 14. Localización de la tensión máxima en la grieta.



$$\sigma_m = 2 \cdot \sigma_0 \cdot \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

Donde ρ_t es el radio de la punta de la grieta, y a representa la longitud de una grieta superficial, o bien la mitad del grado con de la longitud de una grieta interna.

A menudo el cociente σ_m/σ_0 se denomina factor de concentración de tensiones K_t , el cual es simplemente una medida del grado con que una tensión externa es amplificada en el extremo de una grieta pequeña.

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0}$$



4. MECÁNICA DE LA FRACTURA

4. MECÁNICA DE LA FRACTURA.

Se puede definir la Fractura como la culminación del proceso de deformación plástica. En general, se manifiesta como la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de un estado de cargas.

Las razones por las que se produce esta fragmentación son, fundamentalmente, diseños defectuosos y elecciones equivocadas de los materiales, además de efectos producidos por procesos de fabricación inadecuados, tratamientos deficientes, montajes imperfectos o condiciones de servicio diferentes a las proyectadas.

4.1. CRITERIOS DE DISEÑO.

En el caso del estudio de componentes sin defectos, el criterio convencional dice que un componente resistirá a las cargas aplicadas siempre que la tensión aplicada, σ , sea menor que la resistencia del material σ_R .

4.1.1. CRITERIO CONVENCIONAL DE DISEÑO EN UN COMPONENTE SIN DEFECTOS.

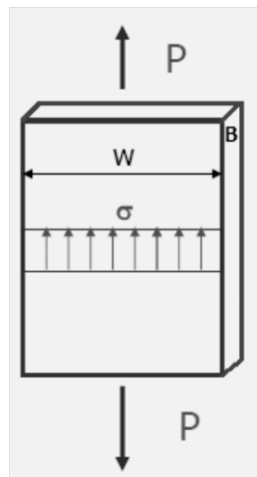


Ilustración 15. Criterio de diseño en un componente sin defectos.

Tensión media aplicada:

$$\sigma = \frac{P}{(W - a) \cdot B}$$

Criterio de diseño:

$$\sigma < \sigma_R$$

Sin embargo, ésta hipótesis no tiene validez en un **componente fisurado**, puesto que estos fallan bajo la aplicación de cargas inferiores a la tensión de rotura del material.

4.1.2. CRITERIO CONVENCIONAL DE DISEÑO EN UN COMPONENTE FISURADO.

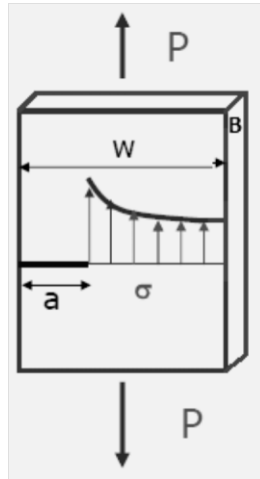


Ilustración 16. Criterio de diseño en un componente fisurado.

Tensión media aplicada:

$$\sigma = \frac{P}{(W - a) \cdot B}$$

Criterio de diseño:

$$K > K_c$$

Este fenómeno obliga a buscar alternativas a los criterios convencionales de diseño desarrollándose los criterios de fractura.

4.2. CRITERIO DE FALLA POR FRACTURA BAJO CONCEPTOS DE MECÁNICA DE FRACTURA ELÁSTICA LINEAL.

Cuando en un componente estructural se encuentra una grieta sometida a una carga, de manera que las superficies de la grieta se desplazan directamente una respecto a la otra, y si en el frente de grieta sólo se tiene una pequeña deformación plástica rodeada de un campo de esfuerzos elásticos, determinado por el factor de intensidad de esfuerzo, entonces como criterio de falla se considera que ocurre una falla por fractura por crecimiento inestable de una grieta cuando:

$$K_t[a, D, S] = K_c \left[T, \frac{dS}{dt}, B \right]$$

Donde K_I es el factor de intensidad de esfuerzo, el cual por lo general depende del tamaño de grieta, las dimensiones del componente y del esfuerzo nominal aplicado. Como se vio anteriormente, por lo general, K_I se expresa como: $K_I = \beta S \sqrt{\pi \cdot a}$, donde el factor de configuración β usualmente se ve afectado por el tipo de carga y por el tamaño de grieta en relación con determinadas dimensiones del componente

Además, la orientación de la grieta juega un papel importante en el factor de intensidad de esfuerzo:

- Grieta longitudinal:

$$K_I = pD/dh \sqrt{\pi a} \left[1 + 3,22 a^2/Dh \right]^{1/2}$$

- Grieta circunferencial:

$$K_I = pD/4dh \sqrt{\pi a} \left[1 + 1,12 a/\sqrt{Dh} \left(1 - \exp(-1,54 a/Dh) \right) \right]$$

Donde a es la semilongitud de la grieta, p la presión interna, D el diámetro y h el espesor de la pared del recipiente:

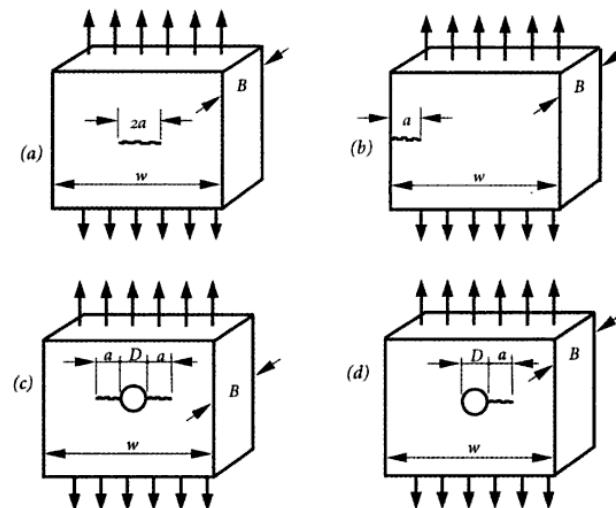


Ilustración 17. Tipos de geometría de las grietas.

4.3. MODOS DE FRACTURA.

La propagación de fisuras puede producirse de tres modos diferentes.

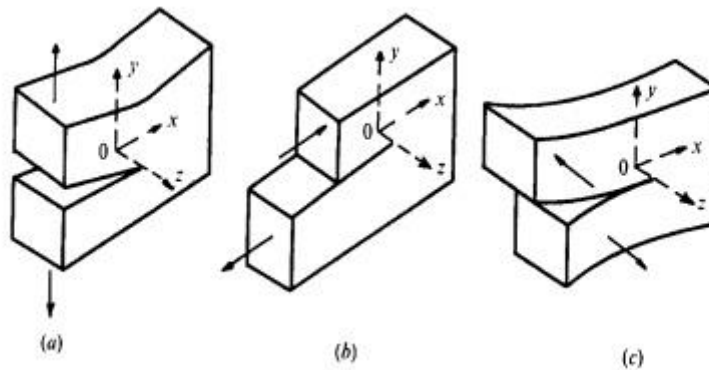


Ilustración 18. Modos de propagación de grieta: (a) Modo I, (b) Modo II, (c) Modo III.

- Modo I: Los flancos de la grieta se separan uno respecto del otro. También llamado modo de tracción.
- Modo II: También llamado modo de deslizamiento tangencial en el plano. Las caras de la grieta deslizan perpendicularmente al borde de la misma.
- Modo III: También llamado modo de deslizamiento tangencial fuera del plano. Los flancos de la grieta deslizan paralelamente al frente de la grieta.

Para cualquiera de estos modos, el campo de tensiones próximo al frente de la grieta presenta una singularidad justo en el vértice de ésta. Dicha singularidad es caracterizada mediante un escalar, que recibe el nombre de Factor de Intensidad de Tensiones, el cual es función de la carga aplicada, la longitud de la grieta y la geometría de la pieza.



5. MECÁNICA DE LA FATIGA

5. MECÁNICA DE LA FATIGA.

5.1. FUNDAMENTOS DE FATIGA.

Cuando un componente mecánico o estructural está sometido a cargas de tensiones variables con el tiempo, existe la posibilidad de que se fracture a tensiones de valores mucho menores que aquellas que podría soportar bajo la aplicación de una carga estática.

Como los elementos de cualquier máquina están normalmente sometidos a este tipo de solicitaciones, cuyo efecto es por lo general más perjudicial que en el caso de solicitaciones estáticas, el análisis del fenómeno de fatiga es de una gran importancia para el diseño mecánico.

5.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ROTURA POR FATIGA.

El origen de la rotura por fatiga siempre es un punto de concentración de tensiones en la superficie del componente.

Debido a lo anterior, la apariencia externa del elemento fracturado, es decir, la superficie por donde se fractura, aporta muchas veces información sobre las condiciones de trabajo y de la rotura del mismo. Si se examina, se podrán observar zonas más o menos claramente diferenciadas.

En las imágenes mostradas debajo se pueden observar las zonas de la rotura claramente diferenciadas y el proceso que sigue al fracturarse un material.

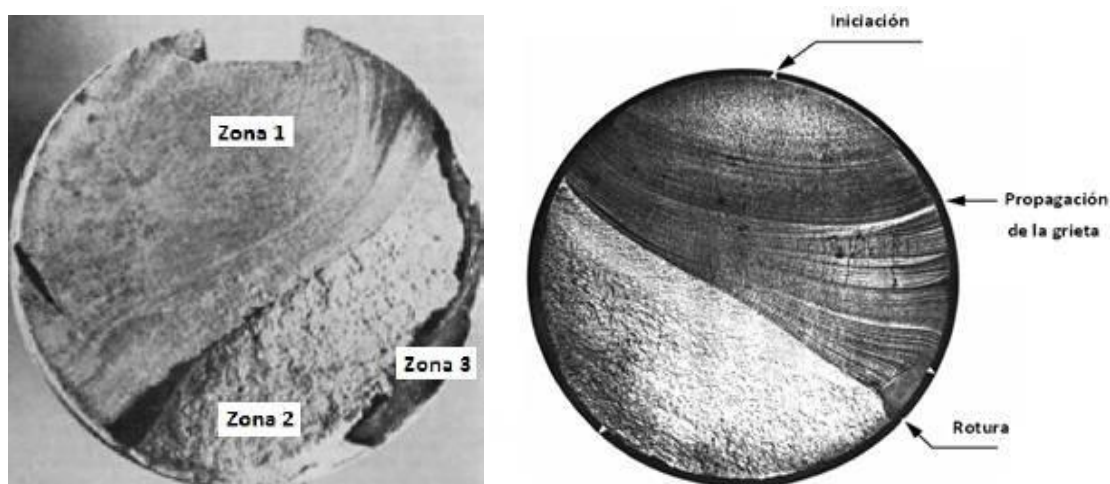


Ilustración 19. Zonas de rotura por fatiga en un eje ferroviario y proceso seguido en la fractura de un eje de motor.



- Zona 1: Se trata de la zona con mayor sección y corresponde a la propagación lenta de la grieta. Normalmente tiene un aspecto liso e incluso a veces es posible distinguir la propagación de la grieta ciclo a ciclo mediante las líneas y estrías que se forman.
- Zona 2: Es la zona que corresponde al crecimiento de grieta con mayor velocidad. Presenta una superficie irregular y ocupa prácticamente la superficie restante de la sección del eje.
- Zona 3: Finalmente, la sección neta de la pieza es incapaz de resistir la carga desde un punto de vista estático debido a su súbita reducción de tamaño, produciéndose la rotura final en un ciclo de carga.

5.1.2. ESTADIOS DE FATIGA.

Una grieta que se desarrolla en un componente sometido a fatiga tiene típicamente tres etapas o estadios: una etapa de iniciación de la grieta, una de propagación estable, y por último una de propagación acelerada que conduce al fallo del componente.

- Estadio I: Iniciación de la grieta

Como norma general, en la superficie de los componentes se pueden localizar zonas con altas cargas alternadas que producen deformaciones plásticas en los granos más próximos a la superficie. Esta deformación se localiza en bandas persistentes de deslizamiento.

Cuando un grano situado en la superficie deforma, se genera un escalón en la superficie que inmediatamente se oxida, y una vez que se oxida, resulta imposible invertir la deformación en ese plano.

La deformación en otro plano deberá ocurrir en otro plano, que formará otro escalón que también se oxidará y que suprimirá la deformación en este nuevo plano.

La repetición de este ciclo de deformación, oxidación y bloqueo termina por formar unos entrantes en la superficie original del sólido, que provocan concentración de tensiones.

La superficie acaba agravándose y aparece una grieta a partir de estos defectos superficiales que se propaga a lo largo de las bandas persistentes de deslizamiento.

En este estadio la grieta encuentra grandes dificultades para atravesar los bordes de grano, y a menudo la microgrieta sólo consigue progresar en un grano y ahí se detiene.

En caso de que la carga sea de un valor más elevado, o con un número de ciclos suficiente, reiniciará la propagación en el grano adjunto.

- Estadio II: Propagación estable

El estadio II o región II es la que tiene mayor interés en los estudios de fatiga.

A medida que crece la grieta, pronto descubre que su dirección de crecimiento no es óptima y que su propagación requiere un menor trabajo si se orienta perpendicular al campo tractivo (modo I). Habitualmente la reorientación de la grieta ocurre cuando la microgrieta ha atravesado unos pocos granos en el material.

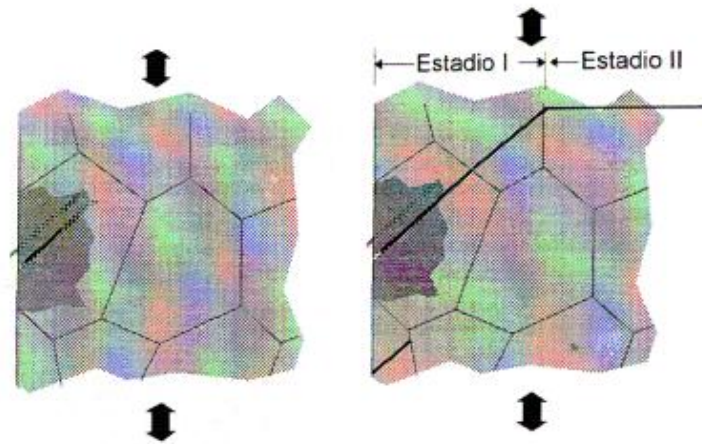


Ilustración 20. Reorientación de la grieta en el estadio II de fatiga según el modo I.

A partir de ese momento, su propagación se vuelve estable y se ajusta a una ley potencial de intensidad de tensiones, de acuerdo con la ley empírica que propusieron Paris y Erdogan en 1960.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_I^m$$

Siendo “a” el tamaño de la grieta, “N” el número de ciclos, y “C” y “m” son constantes que dependen del material y del medio ambiente.

Según esta ley, a medida que crece el tamaño de grieta, si las tensiones alternantes con constantes, aumentará ΔK_I y como consecuencia su velocidad de crecimiento da/dN .

- Estadio III: Propagación acelerada

Cuando la fisura alcanza un valor determinado conocido como tamaño crítico de fisura o K_{IC} , la propagación se convierte en catastrófica. La pieza rompe debido a que tiende a dividirse en capas paralelas o por coalescencia de materiales.

El estadio III de fatiga carece de interés, por lo general, ya que la velocidad de crecimiento de grieta es tan elevada que el número de ciclos consumidos en esta etapa apenas cuenta en la vida de la pieza, comparado con las otras dos etapas.

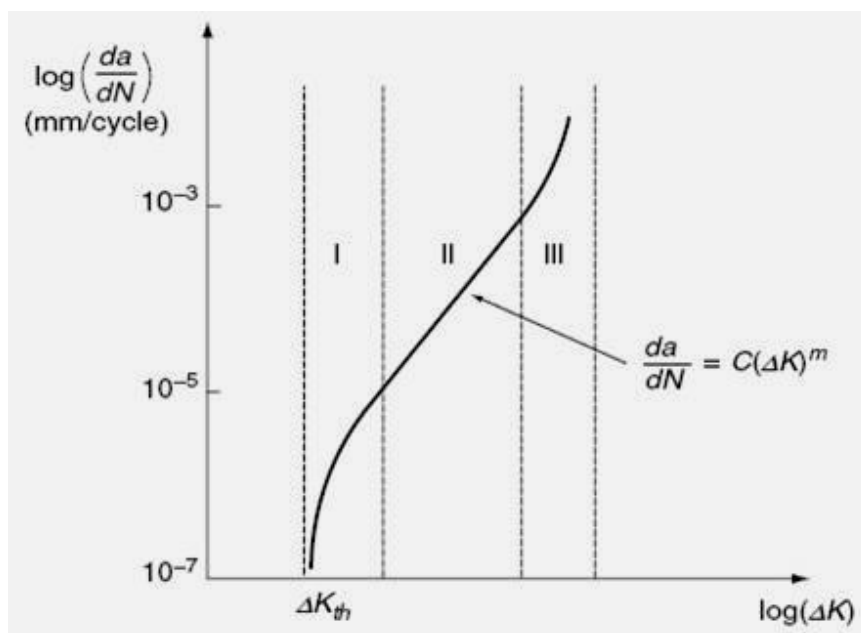


Ilustración 21. Representación a escala logarítmica de la relación entre la velocidad y la propagación de la grieta a fatiga (da/dN) y la amplitud del factor de intensidad de tensiones (ΔK).

5.2. CURVAS S-N (STRESS – NUMBER OF CYCLES).

La influencia de la geometría, la forma y la magnitud de las cargas y el material usado se plasma en la curva S-N (Stress – Number of cycles), ó como también conocida como curvas de Wohler.

Estas curvas representan la duración de la probeta, expresada en número de ciclos hasta rotura (N), para la máxima tensión invertida aplicada (S). Dicho de otra manera, representan cuantos ciclos son necesarios para que, en una probeta sometida a un esfuerzo determinado, se origine la aparición de una grieta a fatiga.

Las curvas S-N se obtienen mediante multitud de ensayos realizados sobre probetas representativas del material con entallas para representar las concentraciones de esfuerzos debidas a las diferentes geometrías que se pueden presentar. Estas probetas se someten a diferentes ciclos de fatiga hasta su rotura.

Para poder estudiar el fenómeno de fatiga se diseñó un ensayo en el cual se sometía a una probeta de sección circular a un esfuerzo de flexión fijo y se ponía a girar. De esta forma y normalizando las características geométricas de la probeta y ambientales del laboratorio surgió el ensayo de viga rotatoria.

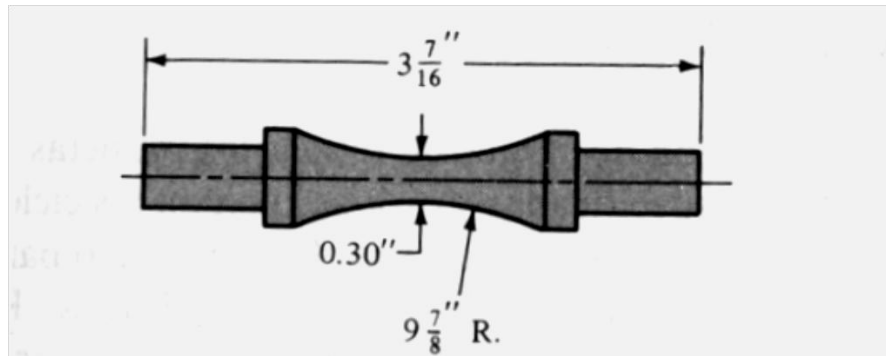


Ilustración 22. Ensayo de flexión rotativa.

Otras máquinas para ensayos de fatiga permiten aplicar a las probetas esfuerzos axiales, torsionales o combinados de tipo fluctuante o alternado (invertido alternativamente).

Para determinar las curvas S-N se realizan ensayos con distintos niveles de tensión. El primer nivel es un nivel de carga próximo a la resistencia a la tracción y el resto son niveles progresivamente inferiores. Posteriormente, se grafican los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas obteniendo finalmente **la curva de Wholer o curva S-N**.

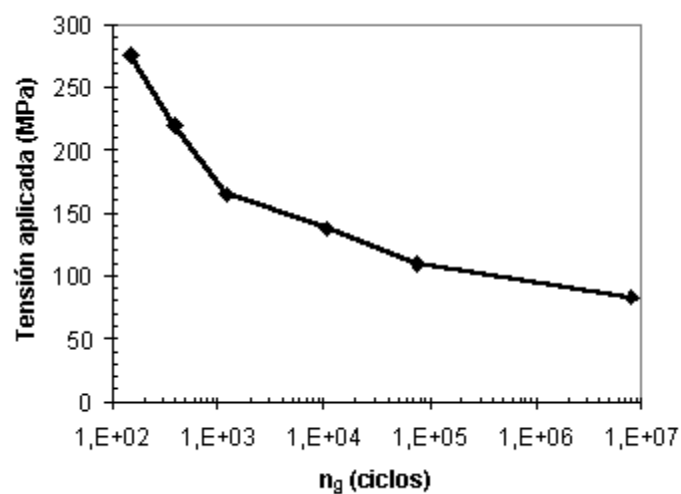


Ilustración 23. Curva de Wholer.

5.2.1. ZONAS EN EL DIAGRAMA DE FATIGA.

El diagrama de fatiga en los materiales féreos suele tener tres zonas claramente diferenciadas. A partir de la siguiente ilustración, se aprecia que la curva S-N se presenta de forma logarítmica.

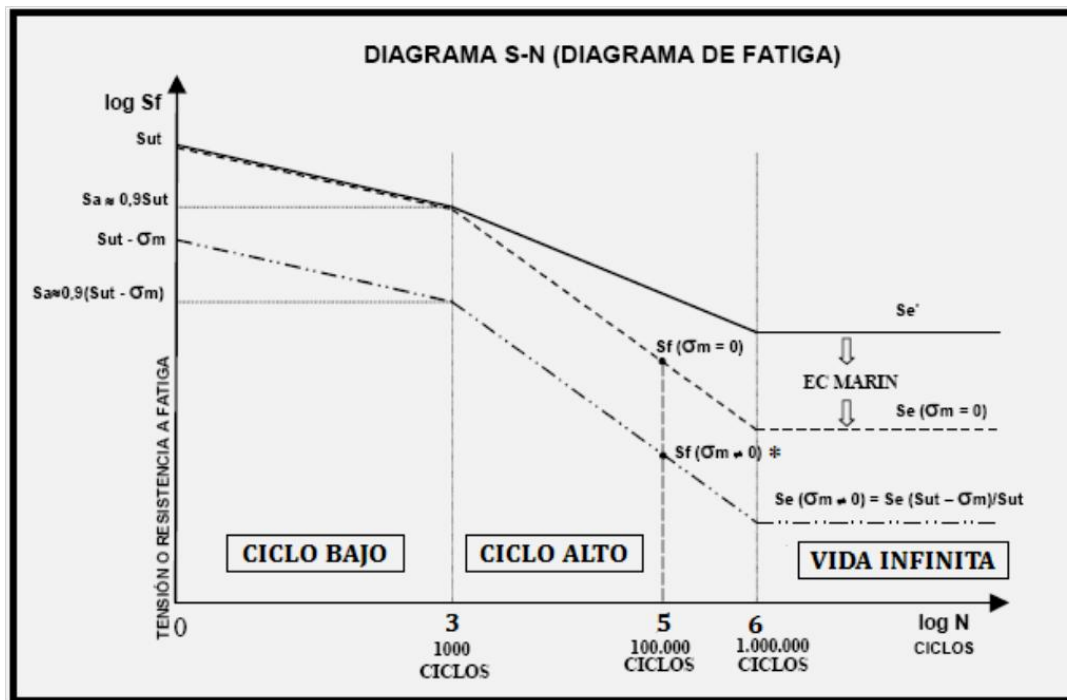


Ilustración 24. Diagrama de fatiga S-N.

- Zona de ciclo bajo: Se sitúa normalmente por debajo de 10^3 ó 10^4 ciclos. En esta zona, el material se comporta de manera muy similar a como lo hace frente a cargas estáticas, pero con una leve reducción de la resistencia.
- Zona de ciclo alto: Hasta 10^6 ó 10^7 ciclos para los aceros. Esta zona muestra una reducción mucho mas brusca con la duración, al mismo tiempo se comprueba que el material se comporta de manera diferente a como lo hace frente a cargas estáticas.
- Zona de vida infinita: Existe un valor de la tensión por debajo del cual la duración de la probeta es infinita, es decir, no rompe. La tensión a la que se produce este efecto se conoce como **límite de fatiga sin corregir** (S_e').

A lo largo de los años se han tratado de buscar, mediante la relación de numerosos estudios y ensayos, correlaciones entre los valores de la resistencia a rotura en tracción (S_{ut}) y el límite de fatiga de la probeta (S_e').

Dependiendo del material, se pueden admitir las siguientes aproximaciones:

- Hierros y aceros forjados $\begin{cases} S_e' = 0.5 \cdot S_{ut} \\ S_e' = 700 \text{ MPa} \end{cases} \quad \begin{matrix} S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa} \\ S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa} \end{matrix}$
- Aceros colados $\begin{cases} S_e' = 0.45 \cdot S_{ut} \\ S_e' = 700 \text{ MPa} \end{cases} \quad \begin{matrix} S_{ut} \leq 600 \text{ MPa} \\ S_{ut} \leq 600 \text{ MPa} \end{matrix}$

5.2.2. CURVAS S-N PARA DISTINTOS TIPOS DE ESFUERZOS

Para los distintos tipos de esfuerzos, las curvas S-N son distintas. En la siguiente ilustración se muestran las distintas variaciones en función del tipo de sollicitación.

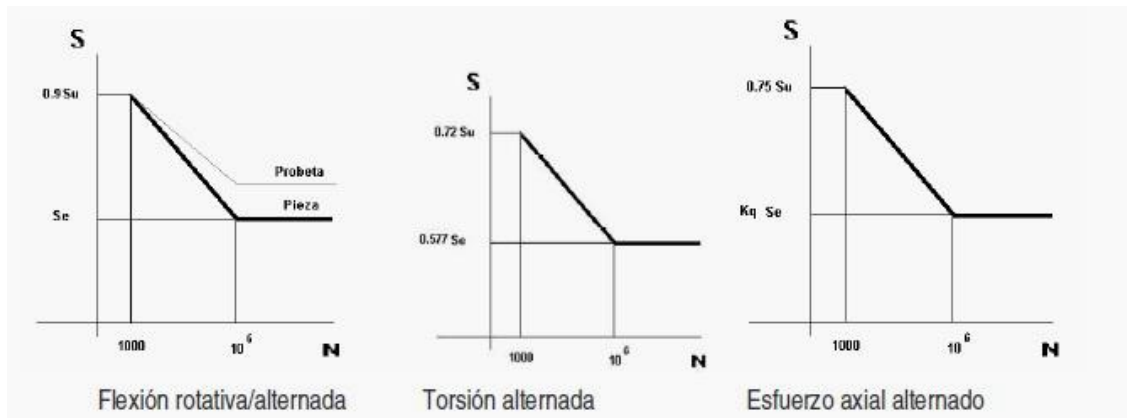


Ilustración 25. Gráficas S-N para los distintos tipos de esfuerzos.

5.2.3. COEFICIENTES MODIFICATIVOS DEL LÍMITE DE FATIGA O COEFICIENTES DE MARIN.

Los valores comentados anteriormente que hacen referencia al límite de fatiga y a la resistencia a fatiga, se aplican en condiciones de ensayos normalizados, para los que, se escogen probetas de tamaño reducido, cuidadosamente construidas, pulidas y montadas en la máquina de ensayos.

En estos ensayos, las condiciones ambientales están también controladas y, además, se controla especialmente que no se introduzcan efectos de carga no deseados, talos como los efectos provocados por vibraciones inducidas por el motor de arrastre o del soporte etc.

No obstante, el tipo de construcción de los componentes de las máquinas guarda poca similitud con las condiciones de la probeta. Por esta razón, en la práctica se utilizan coeficientes modificativos con el objetivo de adaptar los valores del comportamiento a fatiga de las probetas a los de cada componente.

Con esta modificación, se obtiene el límite de fatiga corregido (S_e), que se define como el valor de la tensión alternante máxima que permite conseguir una vida infinita del mismo en las condiciones de funcionamiento.

La ecuación que permite relacionar el límite de resistencia a fatiga a partir del ensayo de viga rotatoria (S_e'), con el límite de fatiga corregido (S_e) y los factores modificativos del límite de fatiga (K_i) se denomina **Ecuación de Marín**.

$$S_e = \prod_i K_i \cdot S_e'$$

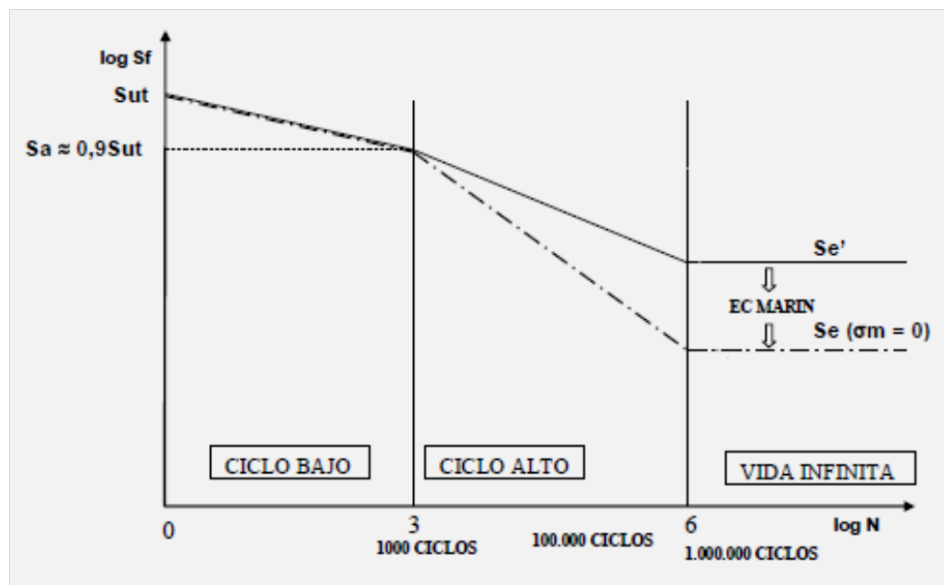


Ilustración 26. Diagrama de fatiga que representa el límite de fatiga corregido.

Los coeficientes K_i obtenidos experimentalmente son los mostrados a continuación:

- K_a : factor de acabado superficial
- K_b : factor de tamaño
- K_c : factor de confiabilidad
- K_d : factor de temperatura
- K_e : factor de concentración de tensiones
- K_f : factor de efectos diversos



Para escoger valores apropiados de cada uno de los coeficientes, en caso de no tener experiencia acerca del tema, existen tablas que aconsejan sobre los mismos, para ya una vez en la fase de prototipos y en la observación del comportamiento de las piezas en servicio, comprobar si la elección ha sido adecuada o no.

A continuación se desarrollan cada uno de estos factores.

5.2.4. FACTOR DE ACABADO SUPERFICIAL K_a .

Una probeta empleada en el ensayo de viga rotatoria posee una superficie muy pulida, a la que además se le da otro pulido final en la dirección axial para eliminar cualquier ralladura circunferencial que pudiera existir. Este factor dependerá de la calidad del acabado superficial y de la resistencia última del material.

La explicación de la reducción del límite de fatiga debido al acabado superficial es que debido a la existencia de una mayor rugosidad en la superficie de la probeta se producen concentración de tensiones en la misma.

El valor de este factor se obtiene de la siguiente relación:

$$K_a = a \cdot S_{ut}^b$$

En la cual, tanto “a” como “b” se obtienen de la siguiente tabla:

Tabla 1. Coeficientes a y b según el acabado superficial.

Acabado superficial	Coefficiente a (MPa)	Exponente b
Pulido	1	0
Acabado fino (esmerilado, rectificado,)	1.58	-0.085
Mecanizado sin acabar/estirado en frío	4.51	-0.265
Laminado en caliente	57.7	-0.718
Forjado	272	-0.995

5.2.5. FACTOR DE TAMAÑO K_b .

Las probetas normalizadas tienen diámetros muy pequeños en comparación con los ejes que se quieren estudiar, dándose así la tendencia general de que cuanto mayor es el diámetro menor es el límite de fatiga.

Para calcular este factor hay que seguir unos pasos y tener en cuenta ciertas consideraciones.

- a) En caso de carga axial, $K_b = 1$ para cualquier diámetro según algunos autores. Sin embargo para otros:

$$K_b = 1 \quad \text{si } d < 10\text{mm}$$

$$K_b = 0.6 - 0.7 \cdot d \quad \text{si } d \leq 10\text{mm}$$

- b) En caso de que exista torsión o flexión en la probeta, el factor de tamaño se calcula por medio de las siguientes ecuaciones, en función del diámetro.

$$K_b = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133} \quad 2.79 \leq d \leq 51\text{mm}$$

$$K_b = 1.189 \cdot d^{-0.097} \quad 52 \leq d \leq 250\text{mm}$$

- c) El último caso que se puede dar es que el componente mecánico a estudiar no tenga sección circular. Por tanto se procederá a calcular el diámetro efectivo.

Este diámetro efectivo se calcula a partir del $A_{0.95}$, que se define como: el área limitada por los puntos de la sección que en algún momento están sometidos a una tensión mayor o igual que el 95% del máximo absoluto.

Si la sección de la pieza fuera rectangular, el área se correspondería con la parte coloreada de la pieza.

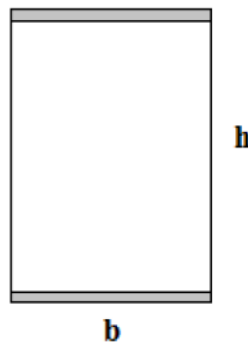


Ilustración 27. Pieza de sección rectangular.

$$A_{0.95} = 0.5 \cdot h \cdot b$$

Se debe tener en cuenta que el 95% del esfuerzo de una sección circular de diámetro d_e sometida a flexión rotatoria, se define:

$$A_{0.95} = \frac{\pi}{4} [d_e^2 - (0.95 \cdot d_e)^2] = 0.0766 \cdot d_e^2$$



Igualando las dos expresiones se obtiene el diámetro efectivo:

$$d_e = \sqrt{\frac{0.05}{0.076}} \cdot h \cdot b = 0.0808\sqrt{h \cdot b}$$

Cuando esto se ha calculado, se podrá calcular el factor de tamaño con las correlaciones antes mostradas.

5.2.6. FACTOR DE CONFIABILIDAD K_c .

La probabilidad es un factor muy importante en los ensayos realizados para obtener las curvas S-N, por esta razón existe el factor de confiabilidad, que permite cuantificar de forma analítica esta probabilidad de fallo.

Los valores de K_c en función de la confiabilidad se muestran en la tabla inferior.

Tabla 2. Factor de confiabilidad K_c .

<i>Fiabilidad</i>	<i>Factor de Fiabilidad K_c</i>
0.5	1
0.9	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702
0.99999	0.659
0.999999	0.620
0.9999999	0.584
0.99999999	0.551
0.999999999	0.520

5.2.7. FACTOR DE TEMPERATURA K_d .

La temperatura es un factor importante a la hora de estudiar la fatiga, ya que modifica las propiedades mecánicas de los materiales, variando además la resistencia última, a fatiga y a fluencia.

Aquí se facilitan unas correlaciones bastante acertadas, pero se recomienda realizar estudios específicos en el laboratorio para conseguir valores más apropiados, ya que la obtención de K_d es una operación muy compleja.

$$K_d = 1 \quad T \leq 450^\circ \text{C}$$

$$K_d = 1 - 5.8 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 450) \quad 450^\circ \text{C} \leq T \leq 550^\circ \text{C}$$

5.2.8. FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES K_e .

Los agujeros, las chavetas, las ranuras y otras discontinuidades son muy comunes en componentes mecánicos, y éstas alteran la distribución del esfuerzo. La posible influencia sobre los componentes se evalúa mediante el denominado factor de concentración de tensiones K_e .

Existen grandes diferencias en función de la naturaleza del material, es decir, no es igual la influencia sobre un material dúctil que sobre uno frágil.

Un material perfectamente dúctil bajo cargas dinámicas, aunque sea capaz de deformarse plásticamente, no dispone del tiempo necesario para hacerlo, y por ello es necesario considerar el efecto de la concentración de tensiones. Sin embargo si se tratara de cargas estáticas, el efecto de la concentración de tensiones en elementos dúctiles se consideraría nulo.

En caso de tratarse de un material frágil, alrededor de la entalla la concentración de tensiones será muy elevada. El tipo de rotura es frágil y no va precedida de una deformación plástica, con lo que es muy peligrosa. Para este caso habrá que considerar el efecto de concentración de tensiones tanto en cargas estáticas como dinámicas.

Los pasos a seguir para la evaluación de K_e se muestran a continuación.

1. Cálculo del factor de concentración de tensiones teóricas K_t en función de su configuración geométrica.

Las siguientes gráficas son algunas de las empleadas para barras de sección circular a modo de ejemplo, pero las gráficas variarán dependiendo de la geometría de la pieza a estudiar (sección circular, rectangular).

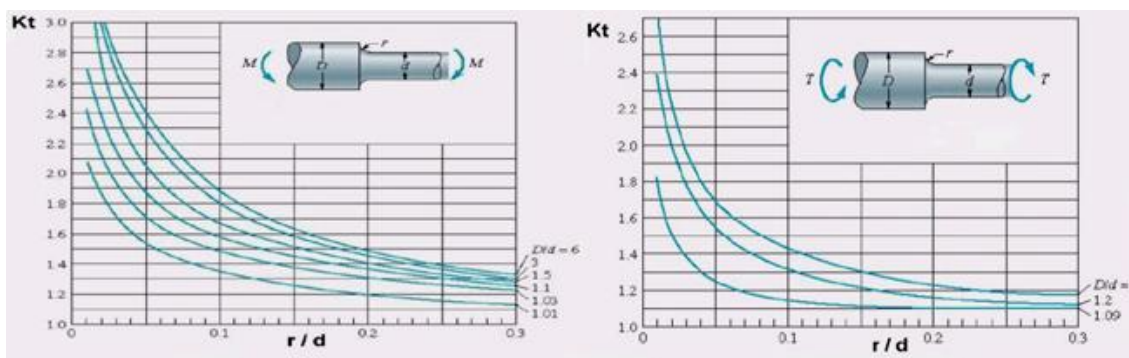


Ilustración 28. Gráficas empleadas para el cálculo de concentración de tensiones teóricas en función de los cambios de geometría.

También variará dependiendo del tipo de discontinuidad (agujeros transversales, muescas, estrechamientos de sección) y del tipo de esfuerzo al que se someterá a la pieza (tracción, flexión o torsión).

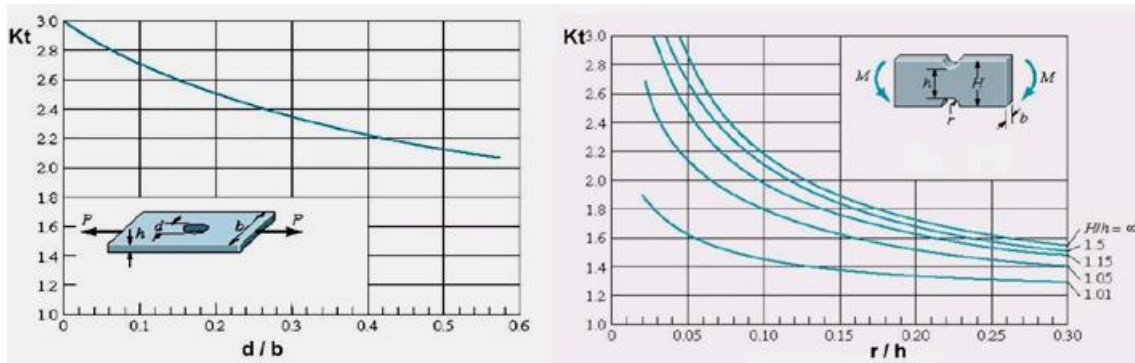


Ilustración 29. Gráficas empleadas para el cálculo del factor de concentración de tensiones teóricas en función del tipo de discontinuidad.

2. Especificando el material se obtiene q , el factor de sensibilidad a las ranuras, empleando las gráficas mostradas debajo. Variará en función de la naturaleza de las cargas que se están sometiendo al elemento mecánico.

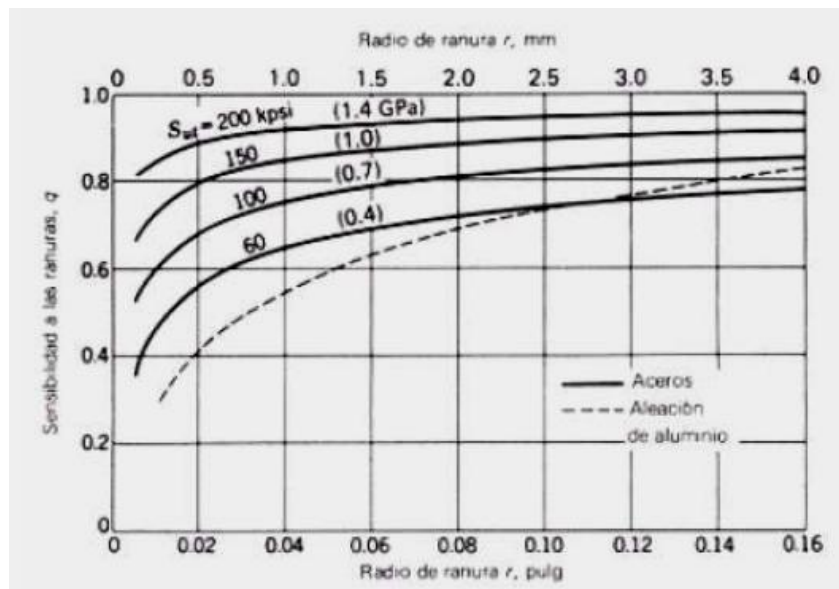


Ilustración 30. Gráfica para el cálculo del factor de sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y axiales alternantes.

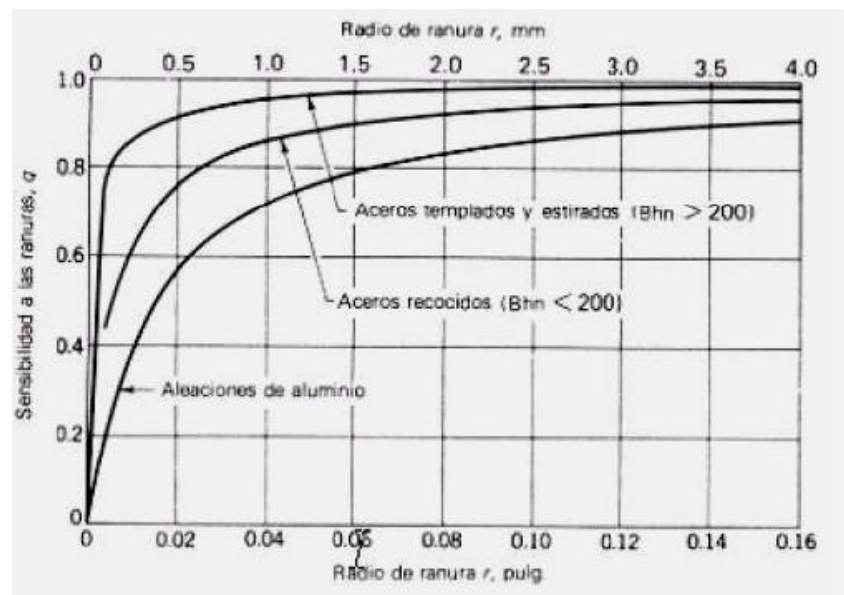


Ilustración 31. Gráfica para el cálculo del factor de sensibilidad a las ranuras para cargas de torsión alternantes.

- Se procede a obtener \mathfrak{R}_f , que se define como el factor de reducción de la resistencia en caso de fatiga, ayudándonos de la siguiente expresión.

$$q = \frac{\mathfrak{R}_f - 1}{K_t - 1}$$

Finalmente se obtiene el factor de concentración de tensiones K_e como la inversa de \mathfrak{R}_f .

$$K_e = \mathfrak{R}_f / 1$$

5.2.9. FACTOR DE DEFECTOS DIVERSOS K_f .

Este factor se utiliza para modificar el límite de fatiga en función de otros aspectos que no se han considerado anteriormente. Como normal general suele ser necesario realizar experimentos para cuantificarlo. A continuación se explican algunos de los más importantes.

- Efectos residuales o remanentes:

Son esfuerzos que permanecen en el material en ausencia de carga, y pueden aumentar el límite de fatiga cuando son de compresión o disminuirlos si son de tracción. Existen operaciones como el bombardeo con perdigones o el martillado que mejoran el límite a fatiga al introducir tensiones residuales de compresión.

- Efectos del temple superficial:

Debido a los diferentes valores de los límites de fatiga del núcleo de un elemento con temple superficial y de la capa templada, puede suceder que supere este valor en la zona de unión del temple al núcleo.

En la figura inferior se muestra la distribución de tensiones que existe normalmente en una barra sometida a torsión o flexión.

La línea gruesa indica los límites de resistencia a la fatiga para la capa superficial y para el núcleo.

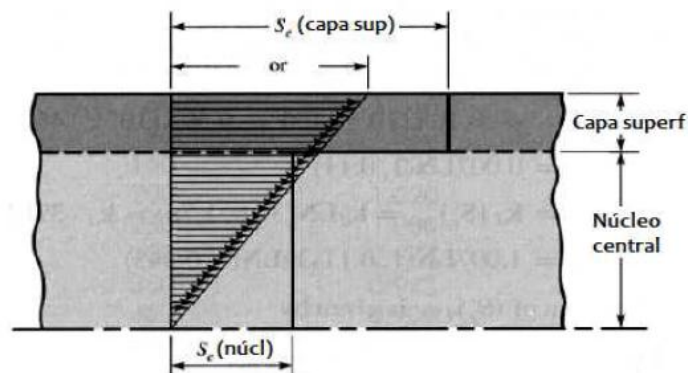


Ilustración 32. Pieza con temple superficial en flexión o torsión.

- Corrosión por apriete o *fretting*:

Esto se produce por el movimiento microscópico en la superficie de piezas mecánicas o estructuras estrechamente ajustadas, como juntas atornilladas. La reducción en la resistencia a fatiga puede ser de hasta el 70%, y su existencia se reconoce por el posible cambio de color en la superficie o por picaduras.

- Recubrimientos electrolíticos:

Los recubrimientos electrolíticos normalmente producen disminución de los límites de fatiga. En procesos como galvanizado no afecta, pero en otros como cromado, niquelado o cadmiado, se puede producir una reducción del límite de fatiga de un 50%.

- Características direccionales operacionales:

En piezas fabricadas por laminado, estirado o forjado, el límite de fatiga se puede ver reducido por la direccionalidad de la operación, ya que el material podría comportarse de forma anisótropa. Debido a esto, la resistencia a fatiga puede ser un 20% menor en dirección transversal que en dirección longitudinal.



- Efectos de corrosión:

La fatiga por corrosión se ha convertido en uno de los principales problemas en el diseño de ejes de ferrocarril. No sólo en este campo cobra gran importancia este tipo de fatiga, sobre todo en otros procesos en los que existen ambientes agresivos, a la intemperie o por ejemplo en zonas bajo la influencia de la sal y el ambiente del mar.

La corrosión disminuye la resistencia a la fatiga debido a que se crean puntos de concentración de esfuerzos que favorecen la creación y posterior propagación de fisuras por procesos de fatiga.

Con la finalidad de encontrar una solución a este problema, se está estudiando a fondo este fenómeno, concretamente en el campo ferroviario, donde se ha comprobado que muchos de los fallos por fatiga se deben a la corrosión.

Con el crecimiento en cuanto a líneas de alta velocidad que se ha producido en todo el mundo, se antoja necesario controlar todos los parámetros con gran exactitud y eficacia, ya que el más mínimo error podría provocar accidentes fatales.

5.3. ESFUERZOS FLUCTUANTES.

En los componentes mecánicos aparecen esfuerzos fluctuantes que en algunas ocasiones, debido a la naturaleza de algunas máquinas rotatorias, adoptan la forma de un patrón sinusoidal. Para conocer este patrón, es necesario conocer las fuerzas máximas y mínimas.

Tomando $F_{máx}$ como la mayor fuerza y F_{min} como la menor, se definen las fuerzas medias (F_m) las alternantes (F_a) de la siguiente forma:

$$F_m = \frac{F_{máx} + F_{min}}{2} \quad F_a = \left| \frac{F_{máx} - F_{min}}{2} \right|$$

Las componentes del esfuerzo se definen:

$\sigma_{máx} = \text{Tensión máxima}$

$\sigma_{min} = \text{Tensión mínima}$

$\sigma_a = \text{Tensión alternante (amplitud de tensión)}$

$\sigma_m = \text{Tensión media}$

$\sigma_r = \text{Intervalo total de tensión}$

$\sigma_s = \text{Tensión estacionaria o estática}$



El procedimiento a seguir se basa en descomponer la carga en sus componentes de tensión media y alternante.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad \sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right|$$

Se supone el estado tensional resultante como la superposición de un estado de carga constante y otro de carga alternante.

Se buscará una relación entre la componente alternante de tensión y la duración esperada del elemento, pero con la salvedad de que la presencia de la tensión media supondrá una disminución de los valores de la resistencia.

5.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE FATIGA CON ESFUERZO MEDIO NO NULO.

El caso en el que los componentes mecánicos poseen esfuerzos y tensiones fluctuantes medias no nulas es el más habitual. Sin embargo en otras ocasiones no se puede contar con información experimental que no sea la correspondiente a los ensayos de flexión rotativa, en la que $\sigma_m = 0$, por tanto la influencia de la tensión media no nula ha de calcularse mediante varias relaciones empíricas que determinan el fallo en una vida cuando las tensiones alternantes y medias son distintas de cero.

Los criterios expuestos a continuación son los más famosos:

5.4.1. CRITERIO DE GOODMAN.

Este criterio nos dice que la variación de la resistencia alternante con la tensión media se describe mediante una recta que pasa por los puntos $(0, S_f)$ y $(S_{ut}, 0)$. Esto quiere decir que el valor de la componente alternante para fallo a N ciclos es S_f , y para la tensión alternante nula, la resistencia media o valor de tensión media para alcanzar el fallo es S_{ut}

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1$$

Esta teoría es una de las más utilizadas en la práctica ya que se aproxima mucho a la realidad y al expresarse de forma lineal presenta una gran ventaja.

5.4.2. CRITERIO DE SODERBERG.

Al igual que la de Goodman, este criterio también sigue una recta, y predice que en ausencia de tensión media, la rotura se produce cuando $\sigma_a = S_f$, pero que para tensión alternante nula y materiales dúctiles, el fallo se produce para $\sigma_m = S_{yt}$.

Para tensiones medias la variación sigue una recta. Así la condición de fallo a N ciclos se establece así:

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_{yt}} = 1$$

Esta teoría es la menos empleada ya que normalmente suele presentar resultados excesivamente conservadores.

5.4.3. CRITERIO DE GERBER.

De las tres que se muestran en este apartado, es la única que no es lineal. Supone que la variación de σ_a con σ_m se representa mediante una parábola cuyo vértice es el punto $(0, S_f)$, su eje es el de ordenadas y pasa por el punto $(S_{ut}, 0)$. Así la rotura a N ciclos se produce cuando:

$$\frac{S_a}{S_f} + \left(\frac{S_m}{S_{yt}}\right)^2 = 1$$

A continuación se mostrarán las diferencias entre los criterios.

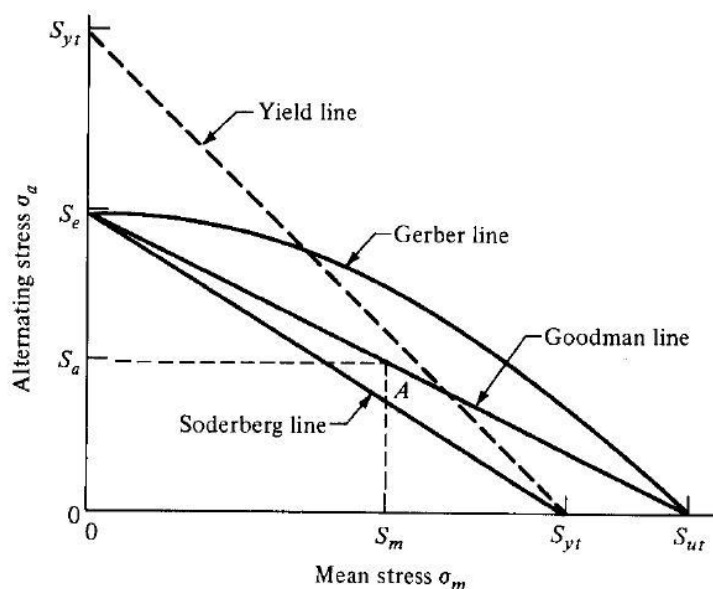


Ilustración 33. Diagrama de fatiga de los diferentes criterios.

Estas gráficas indican que si un punto de coordenadas (σ_m, σ_a) está por debajo de las curvas, se tiene seguridad para esa duración en concreto. En caso de encontrarse sobre la misma curva, cabe esperar el fallo tras esa duración, y si se encuentra por encima, el fallo se producirá antes de la duración determinada.

A diferencia de las dos teorías, el criterio de Soderberg previene contra el fallo por fluencia, es decir, asegura que la tensión máxima nunca superará el valor de la resistencia a fluencia (Yield line).

En caso de tener tensión alternante nula y media inferior a S_{ut} , pero superior a S_{yt} , según los criterios enunciados por Goodman y Gerber no se alcanzaría la rotura, pero sí la fluencia.

Esto quiere decir que el material rompería por fluencia, no por fatiga.

5.5. LÍNEA DE CARGA.

En la mayoría de los sistemas mecánicos, las propias características de funcionamiento hacen que las variaciones de la tensión alternante sólo puedan presentarse acompañadas de variaciones de la tensión media.

Imaginemos el caso de un elemento mecánico, como pudiera ser un diente de un engranaje, sometido a unos esfuerzos fluctuantes entre un valor determinado y cero. En la zona donde se lleva a cabo el engrane, el diente estará sometido a un esfuerzo de flexión mientras que el diente estará libre de esfuerzos en la zona donde no engrane. Esto indicará que las tensiones medias y alternantes serán igual a la mitad de la tensión máxima y en caso de existir una sobrecarga, la tensión alternante aumentaría, pero también lo haría la tensión media.

Se denomina línea de carga a la representación de un diagrama $\sigma_m - \sigma_a$ de los posibles estados tensionales del sistema a estudiar, cuando la carga externa experimenta variaciones de acuerdo con la naturaleza del sistema.

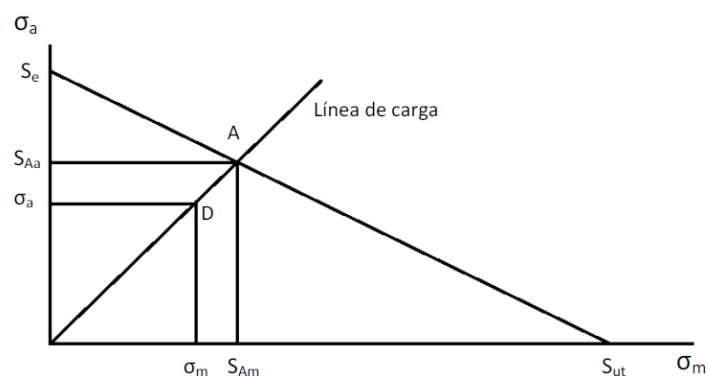


Ilustración 34. Línea de carga en el diagrama de Goodman para vida infinita.



En caso de desear vida infinita, el punto A indicaría dónde se produciría el fallo.

Si el factor de seguridad se considera como factor de aplicación de la carga, se intentaría buscar el número por el que se ha de multiplicar la carga, y por tanto las tensiones a las que afecta, hasta que la media y la alternante fueran las que correspondieran al punto A.

Dado que el punto A verifica la ecuación de Goodman:

$$\frac{S_{Aa}}{S_e} + \frac{S_{Am}}{S_{ut}} = 1$$

Si la carga externa se multiplica por un factor “n” para llegar a la situación límite, las tensiones medias y alternantes de diseño también se multiplicarán por el mismo factor.

$$\frac{n \cdot \sigma_a}{S_e} + \frac{n \cdot \sigma_m}{S_{ut}} = 1$$

Finalmente se obtiene el coeficiente de seguridad “n”:

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}}$$

5.6. DAÑO ACUMULATIVO.

El principal problema que presenta la fatiga es la acumulación de daño en la estructura del material del componente. Debido a que muchas sollicitaciones reales no son tan exactas como para responder a los patrones comentados hasta ahora, es necesario establecer un patrón de análisis que permita evaluar el proceso de daño ante sollicitaciones como pudiera ser una secuencia de tensiones con amplitudes y componentes medias variables.

Hay varios modelos para predecir la vida a fatiga de los componentes en servicio sometidos a sollicitaciones de amplitud variable. Entre ellos, el más simple y conocido es del de Palmgren-Miner. Sin embargo este modelo tiene unas limitaciones, ya que no tiene en cuenta el efecto ejercido por el orden de aplicación de los ciclos, lo cual puede conducir a importantes errores a la hora de calcular la vida en servicio de un equipo.

Con el fin de superar estas limitaciones se han desarrollado otros métodos que sí tienen en cuenta el efecto ejercido por el orden de aplicación de los ciclos sobre el daño acumulado. A continuación se explican los métodos más utilizados y con mayor grado de precisión, además de la mejora que supone respecto al método de Palmgren-Miner.



5.6.1. MODELOS DE ACUMULACIÓN DE DAÑOS DE FATIGA.

- Modelos de acumulación lineal de daño

El modelo más empleado en la predicción de daño acumulado de manera lineal, debido en gran medida a su sencillez de cálculo, es el de Palmgren-Miner.

Este modelo parte de dos supuestos:

1. La aplicación de n_i ciclos consume una fracción de vida igual al cociente n_i/N_i . Donde N_i es el número de ciclos a rotura en un ensayo de amplitud constante, efectuando en las mismas condiciones de tensión media y amplitud de tensión.

$$d_i = \frac{n_i}{N_i}$$

2. El fallo del componente se producirá cuando la suma de todas estas fracciones de vida alcance la unidad.

$$D = \sum d_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \geq 1$$

No obstante, este modelo presenta una desventaja importante, y es que como no se tiene en cuenta el efecto ejercido por la secuencia de aplicación de los ciclos, esto puede conducir a predicciones erróneas.

La facilidad de cálculo del método lo hace ser muy utilizado, pero se han de introducir algunas mejoras para reducir el error y alcanzar así una mayor precisión.

Se han propuesto varios métodos para no cuestionar la acumulación lineal de daño, aunque intentar introducir el efecto ejercido sobre la vida a fatiga por la secuencia de aplicación de las cargas de diversas formas.

Cabe destacar por ejemplo, que se ha establecido un valor de la suma de las fracciones de vida distinto de la unidad, que el efecto de daño de fatiga se considere como el provocado por una entalla que se hubiera introducido en el material o que, dado que los ciclos de mayor amplitud generan unas tensiones residuales en el fondo de la grieta, afectando a su posterior progresión bajo los ciclos menores, el número de ciclos a rotura a utilizar en el cálculo no sea el obtenido en ensayos de amplitud constante sino en los efectuados sobre probetas a las que se ha aplicado una precarga de un nivel igual a la tensión máxima de la secuencia real de ciclos, de forma que induzca una tensión residual similar.

- Modelos de acumulación no lineal de daño

Así como es lógico pensar que un modelo de acumulación lineal de daño sigue una recta, cualquier modelo que proponga una acumulación no lineal de daño, estará expresado por una ley con forma de curva.

El modelo con una mayor aceptación muy posiblemente fue la formulada en 1981 por Manson y Halford.

El concepto de curva de daño establece que la acumulación del mismo se produce acorde a la curva asociada con el nivel de vida correspondiente.

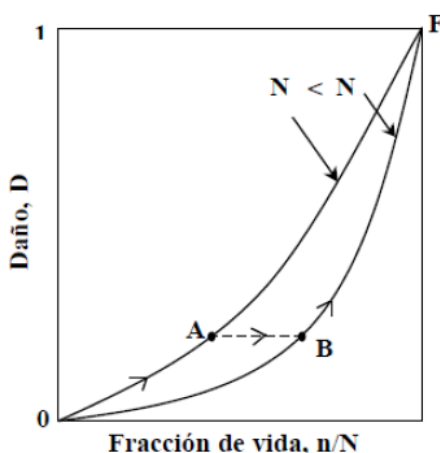


Ilustración 35. Curvas de daño correspondientes a dos niveles de tensión aplicada.

Observando la figura mostrada, se puede suponer que si el primer bloque de ciclos de amplitud constante incrementa el daño desde cero hasta el nivel correspondiente al punto A, cualquier daño que se produzca en diferentes condiciones de tensión deberá partir desde este mismo nivel (B), y seguir la curva obtenida para la nueva tensión.

En caso de variarse de nuevo el nivel de tensión de los ciclos de fatiga, el proceso continúa de manera similar hasta el momento en que se produce la rotura, el cual sería el nivel de daño 1.

Esta curva representa esquemáticamente el proceso de acumulación del daño de fatiga y en ella se observa el efecto ejercido por el orden de aplicación de ciclos.

Si el primer bloque de ciclos se aplica a un nivel de tensión elevado, se llega hasta el punto A, y si en ese punto se reduce el nivel de la tensión, se pasa del punto A al punto B, para seguir en esta nueva curva hasta llegar a la rotura. En este caso, la suma de las relaciones entre el número de ciclos aplicados y aquellos que conducen a la rotura en fatiga de amplitud constante, omite el tramo AB, y será inferior a la unidad.



Pero en caso de aplicar los ciclos en orden inverso, el tramo AB se incluirá dos veces, por lo que la suma total de las fracciones de vida será mayor que uno.

5.7. INFLUENCIA DEL MEDIO AMBIENTE EN LA FATIGA.

1. Influencia ambiental sobre la resistencia local

- Por lo general, las aleaciones de aluminio, los aceros inoxidable y otras aleaciones no férricas presentan mayor duración en vacío que en el aire, tanto a temperatura ambiente como especialmente a temperaturas elevadas.
- Los aceros poseen mayor resistencia a la fatiga en agua pura que en agua contaminada con cloruros.
- Los aceros y las aleaciones de aluminio, titanio y magnesio tienen mayor resistencia a la fatiga si no hay vapor de agua en el aire.
- Los efectos de la temperatura y de la frecuencia utilizada en los ensayos, observados habitualmente en los efectuados en aire, desaparecen o se reducen de forma drástica cuando se realizan en vacío.
- Otros ambientes con baja presión parcial de oxígeno, como el sodio o el helio, incrementan la vida de fatiga de los aceros, en comparación con los resultados en aire.

2. Influencia ambiental sobre la propagación de grietas

- El crecimiento de grietas es mayor en el aire que en el vacío.
- En el caso de aceros y aleaciones de aluminio y titanio la velocidad de crecimiento de grieta aumenta en presencia de agua con soluciones de cloruros o carbonatos, en comparación a los resultados obtenidos en aire.
- La mayor influencia medioambiental en la propagación de la grieta tiene lugar en la fase inicial de crecimiento de la misma.
- a existencia de vapor de agua en el aire incrementa la velocidad de crecimiento de la grieta en aleaciones no férricas, aceros de baja aleación, y especialmente en aceros de alta resistencia.



6. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO. INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA



6. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO. INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA.

6.1. INTRODUCCIÓN.

Se denomina ensayo no destructivo a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Los ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique daño considerable a la muestra examinada.

La inspección no destructiva es una herramienta muy empleada en la detección, caracterización y evaluación de fallos, pues permite mantener la integridad de las piezas y con ello la posibilidad de realizar análisis posteriores.

A partir de la descripción que se realizará a continuación, se pretende realizar un acercamiento a las diferentes técnicas de inspección no destructivas, todo ello con la finalidad de aprender qué es la inspección no destructiva de materiales.

6.2. ENSAYOS DE MATERIALES.

Los ensayos de materiales son procedimientos, generalmente normalizados, destinados a determinar las propiedades y características de los materiales, así como su comportamiento en servicio.

Mediante el ensayo de materiales se deben determinar sus valores de resistencia, verificar sus propiedades y establecer el comportamiento de aquellos bajo la acción de influencias externas. Existen diferentes tipos de ensayos en los que se determinan características distintas en cada uno de ellos. Así pues, en los ensayos físicos se suelen determinar las dimensiones de los cuerpos, la forma, el peso etc., y en los ensayos mecánicos la resistencia, elasticidad y plasticidad, ductilidad, tenacidad y fragilidad, etc.

Las funciones principales de los ensayos de materiales son:

- Caracterización de materiales
- Control de calidad desde la fase inicial hasta la fase final del proceso.
- Previsión de fallos en servicio, haciendo posible analizar las causas de dichos fallos.
- Las diferentes pruebas y ensayos se pueden clasificar en:
- Pruebas destructivas: mediante las pruebas destructivas, se pretendía determinar cuantitativamente el valor de ciertas propiedades como por ejemplo la resistencia



mecánica, la tenacidad o la dureza, y también para comprobar si las características de un material cumplen con lo especificado durante el diseño. Se tratan de ensayos muy sencillos de llevar a cabo y que proporcionan abundante información sobre la pieza o el material de ensayo. Además, este ensayo alterando de forma permanente las propiedades del componente sujeto a inspección.

- Pruebas no destructivas: con el desarrollo de nuevas tecnologías y la optimización de los productos o los requisitos de seguridad, se impusieron también nuevas condiciones de inspección, en las cuales se estableció la necesidad de verificar hasta en un 100 % los componentes críticos. Esto resultó ser una dificultad para los departamentos de calidad, hasta que iniciaron el empleo de otras técnicas de inspección, con las que se podía medir la integridad de componentes sin destruirlos. Con ello, se inició la aplicación de las pruebas no destructivas.

6.3. INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA EN MATERIALES.

Los ensayos no destructivos (en adelante, END) juegan un papel importante y crítico a la hora de verificar que los componentes, estructuras y sistemas cumplen con la función para la que fueron diseñados. Gracias a los END, es posible determinar el estado de los materiales y prever la posibilidad de fallo de elementos estructurales que podrían causar, por ejemplo, que un tren descarrilara.

La inspección no destructiva, es basa en la aplicación de métodos físicos con la finalidad de comprobar el estado de las piezas examinadas sin alterar de forma permanente las propiedades de los materiales examinados.

Entre los múltiples usos de los END, encontramos:

- Detección y evaluación de defectos y discontinuidades (tanto internas como superficiales).
- Detección de fugas y filtraciones.
- Medidas dimensionales.
- Caracterización de estructuras y microestructuras.
- Estimación de propiedades físicas y mecánicas.
- Medidas de tensión y respuesta dinámica.
- Determinación del tipo de material y composición química.



Debido a su campo de aplicación, no resulta inusual que los END sea usada en alguna etapa de la producción o ciclo de vida de muchos componentes. Algunas de estas aplicaciones son:

- Como parte del desarrollo de nuevos productos.
- Para observar o clasificar nuevos materiales.
- Para mejorar y controlar procesos productivos.
- Para verificar que las diferentes etapas de dichos procesos se realizan de forma correcta.
- Para verificar que el montaje se realiza de forma correcta.
- Para inspeccionar posibles daños de elementos en servicio.

6.4. PRINCIPALES MÉTODOS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA.

Existe un número muy amplio de métodos y ensayos no destructivos. Además, gracias a la investigación, se continúa encontrando nuevos métodos de inspección no destructivos y nuevas formas de mejorar los existentes.

En cuanto a la aplicación del ensayo, los END se dividen en:

- Técnicas de inspección superficial.
- Técnicas de inspección volumétrica.
- Otras técnicas de inspección no destructiva.

6.5. TÉCNICAS DE INSPECCIÓN SUPERFICIAL.

Estas pruebas informan acerca del estado superficial de los materiales inspeccionados. En esta técnica encontramos la inspección visual (IV), líquidos penetrantes (LP) y partículas magnéticas.

Inspección visual.

Se trata de la detección, por medio del ojo humano o por un sistema de inspección visual, de los cambios sucedidos, en las superficies de los elementos, de las propiedades de la luz.

En general, las inspecciones visuales son utilizadas para dos propósitos.

- La inspección de superficies expuestas o accesibles de objetos opacos, incluyendo la mayoría de ensambles parciales o productos terminados.
- La inspección del interior de objetos transparentes tales como vidrio, cuarzo, algunos plásticos, líquidos o gases.

Se trata del método más antiguo y común de la inspección no destructiva empleado por el hombre. Hoy en día, la inspección visual se encuentra entre los principales procedimientos de inspección para detectar y evaluar discontinuidades.

Para facilitar la inspección visual se pueden utilizar accesorios ópticos, los cuales son capaces de ayudar a realizar inspecciones visuales. Podemos encontrar los siguientes accesorios ópticos:

- Espejos.
- Lentes.
- Microscopios.
- Amplificadores de imagen, como lupas o instrumentos similares.
- Boroscopios.



Ilustración 36. Dispositivos utilizados en la inspección visual.



Existen distintos tipos de métodos de inspección en función de si es necesario o no el uso de elementos auxiliares. Esos tipos de métodos de inspección son los siguientes:

- Examen visual directo: puede hacerse cuando el acceso es suficiente para colocar el ojo dentro de 600 mm de la superficie que será examinada y a un ángulo no menor de 30° de la superficie que será examinada. Se pueden utilizar espejos para mejorar el ángulo de visión y también los dispositivos auxiliares como lentes amplificadoras para ayudar en los exámenes.
- Examen visual remoto: cuando se da una observación en la que el ojo se encuentra a una distancia mayor de 610 mm y un ángulo menor de 30°, se trata de un **examen visual remoto**. En este examen visual es posible usar dispositivos auxiliares visuales como espejos, telescopios, boroscopios, fibra óptica, etc.

La inspección visual es el primer paso de cualquier evaluación. Para muchos objetos, la inspección visual es utilizada para determinar:

- Cantidad.
- Tamaño.
- Forma o configuración.
- Acabado superficial.
- Reflectividad (reflexión).
- Características de color.
- Ajuste.
- Características funcionales.
- La presencia de discontinuidades superficiales.

Antes de realizar cualquier inspección, es necesario realizar una preparación superficial en la que se debe eliminar toda suciedad u óxidos que puedan enmascarar los defectos. Además, se debe utilizar una fuente de luz con la potencia suficiente para obtener diferentes ángulos de incidencia.

El ensayo de inspección visual debe ser realizado por personal con un cierto grado de conocimiento sobre los materiales que están siendo inspeccionados, así como también, del tipo de irregularidades o discontinuidades a destacar en los mismos.



Inspección por líquidos penetrantes.

La inspección por líquidos penetrantes puede ser definida como un procedimiento de inspección no destructiva diseñado para detectar y exponer discontinuidades superficiales en materiales de ingeniería.

Este método se emplea sobre todos los materiales no porosos, o no excesivamente rugosos, como metales, cerámicos, vidrios, plásticos, etc. Las grietas en este tipo de materiales actúan como capilares favoreciendo la penetración de fluidos que tengan una reducida tensión superficial.

El principio en el cual se basa esta técnica no destructiva es la capacidad de que un líquido pueda penetrar por capilaridad y ser retenido en las discontinuidades abiertas a la superficie como pueden ser fisuras y poros.

La inspección por líquidos penetrantes es uno de los métodos de inspección no destructiva más antiguo. Basado en el viejo proceso conocido como el aceite y el blanqueador. Sus principios se originan en los talleres de mantenimiento de ferrocarriles. A finales del siglo XIX la parte a inspeccionar era sumergida en aceite usado, después de unos pocos minutos de penetración la parte era limpiada hasta eliminar el exceso de penetrante y entonces la parte se cubría con una mezcla de talco y alcohol. Donde existían grietas, el aceite atrapado era exudado, haciéndolas visibles.

Unos años más tarde, el método fue reemplazado por partículas magnéticas en materiales ferromagnéticos, especialmente en la industria aeronáutica, era necesario contar con un método de inspección más fiable y sofisticada que el método del aceite y blanqueador. Por ello, el método fue refinado.

El proceso de inspección por líquidos penetrantes es el siguiente:

1. Preparación y limpieza: consiste en limpiar perfectamente la zona de interés que se va a inspeccionar. Para la realización de una limpieza adecuada debe determinarse el tipo de contaminante que existe en la superficie. Esto no es una tarea fácil, ya que a veces resulta difícil identificar los constituyentes de un contaminante. Una vez realizada la identificación se a la limpieza del elemento en la superficie a inspeccionar, el cual depende de los contaminantes existentes en la superficie a inspeccionar.
2. Secado después de la limpieza: es esencial que las superficies de las piezas se encuentren completamente secas después de la limpieza, ya que cualquier líquido residual puede impedir la entrada del penetrante.



3. Aplicación del penetrante y tiempo de penetración: en este paso el penetrante es aplicado sobre la superficie que será inspeccionada hasta que toda la pieza o el área bajo la inspección esté completamente cubierta por él. El penetrante puede ser aplicado por **inmersión, aerosol (aspersión) o por brocha**.
4. Remoción del exceso de penetrante: al transcurrir el tiempo suficiente para permitir que el penetrante sea atrapado por las discontinuidades abiertas a la superficie, el exceso de penetrante sobre la superficie inspeccionada debe ser removido. La remoción resulta ser un paso crítico en el ensayo, ya que una remoción errónea puede producir malas interpretaciones o resultados incorrectos. Si no se elimina la cantidad de penetrante correcta, puede formarse un efecto de fondo visible o fluorescente que reduce el contraste, pudiendo ocultar indicaciones de discontinuidades significativas o que puede interferir en la inspección. Con una buena remoción del exceso de penetrante, las indicaciones aparecerán claramente con un color intenso o un contraste brillante y pueden ser fácilmente vistas.
5. Secado: el secado después de la remoción del exceso de penetrante depende del método de remoción y del revelador que será usado. El secado después de la remoción depende del tipo de proceso de remoción que se haya utilizado.
6. Aplicación del revelador: sobre la superficie ya preparada se coloca el revelador de forma seca o finamente pulverizado en una suspensión acuosa o alcohólica, ya que una vez evaporada, deja una fina capa de polvo. Los reveladores actúan de muchas formas, todas ellas aumentando la visibilidad, por lo que puede considerarse que son los encargados de hacer visibles las indicaciones.
7. Inspección: se trata de una parte crítica del proceso de inspección por líquidos penetrantes. Se requiere una iluminación adecuada para asegurar que no exista pérdida en la sensibilidad durante la inspección. Existen distintos modos de inspección:
 - Inspección de penetrantes visibles: pueden ser examinadas con luz de día o con luz blanca o artificial, mediante el empleo de focos o lámparas. Las indicaciones son de color rojo sobre fondo blanco.
 - Inspección de penetrantes fluorescentes: son examinadas con luz negra y en área oscurecida. La intensidad de la fluorescencia es asociada con el volumen y la concentración de penetrante retenido en la discontinuidad.
8. Interpretar y evaluar: se tratan de dos pasos completamente distintos ya que, al interpretar determinamos qué condición está causando las indicaciones obtenidas, además del hecho de decidir si las indicaciones obtenidas son falsas, no relevantes o relevantes. Cuando la indicación se toma como verdadera, hay que aceptarla o rechazarla. De esto se encarga la evaluación de indicaciones. la evaluación se

realiza basándose en un criterio de aceptación y rechazo, el cual se considera el efecto de que la discontinuidad tendrá en el servicio o funcionamiento del componente. Si una indicación relevante se rechaza tras la evaluación, pasará a ser considerada como defecto.

9. Registro: una vez realizada la interpretación de las indicaciones, hemos de proceder a su registro. En muchas ocasiones, es conveniente registrar las indicaciones. Los métodos de registros que pueden ser utilizados son:
 - Dibujos o croquis.
 - Técnicas para recoger indicaciones.
 - Fotografía.
10. Limpieza posterior: consiste en la eliminación de los agentes químicos utilizados en los materiales ensayados con el propósito de prevenir posteriores ataques. Este proceso no suele ser necesario si ha sido usado un revelador seco. En cambio, los reveladores acuosos no deben ser removidos. Cuando el revelador resulta difícil de remover, puede ser restregado con una brocha o cepillo y detergente.

La siguiente ilustración representa gráficamente el proceso descrito.

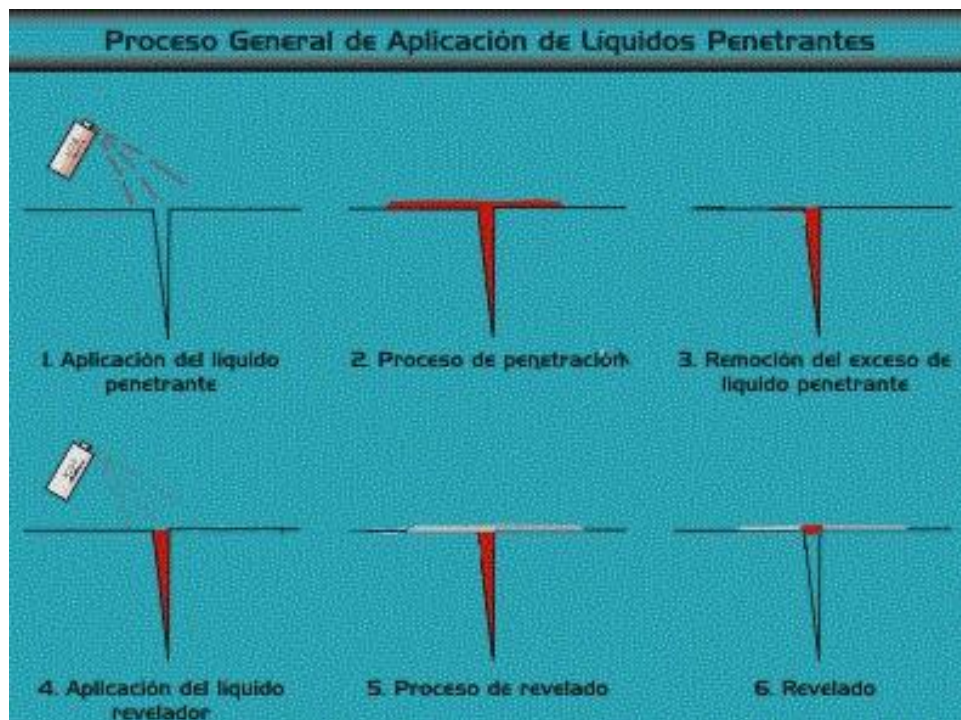


Ilustración 37. Fases del análisis por líquidos penetrantes.



Las aplicaciones del método de inspección por líquidos penetrantes se engloban fundamentalmente en el trabajo de los metales como la fundición, la soldadura, la forja, etc. En este tipo de trabajos los metales cambian su estructura cristalina y pueden desarrollar efectos en los que se pueden dar la formación de defectos. Este tipo de defectos está relacionado al tipo de metal y a los métodos de trabajo. La fundición, forjado, soldadura, tratamiento térmico, maquinado y formado pueden producir discontinuidades que son características del metal, la forma de la parte, el medio ambiente de uso y el tipo de cargas. A continuación explicamos la relación entre el procesamiento del metal y el desarrollo de discontinuidades.

- Soldaduras: las soldaduras son similares a las fundiciones. Por tanto, entre las discontinuidades que encontramos algunas son similares a las de la fundición. Dichas discontinuidades son la porosidad, falta de penetración en la raíz, grietas, inclusiones de escorias, grietas de cráter o estrella, faltas de fusión y grietas en la zona afectada por el calor. Las soldaduras son normalmente inspeccionadas con un penetrante visible usando el método removible con solvente. También se utiliza el método de penetrantes fluorescentes lavables con agua en las soldaduras realizadas en recipientes a presión o estructuras grandes. No obstante, por la capacidad de detectar algunas discontinuidades subsuperficiales, en ocasiones se prefiere la inspección por partículas magnéticas.
- Forjas: las forjas son originalmente fundiciones, las cuales son trabajadas con martillos o prensas para cambiar la estructura cristalina de la fundición, para formar una estructura de grano fino direccional en el metal. Este trabajo del metal también aplanar discontinuidades globulares tales como inclusiones, porosidad y contracciones. Además, en el proceso de forjado se desarrollan discontinuidades características como son los reventones, las grietas, hojuelas o escamas y los traslapes y costuras.
- Inspección de campo y en servicio: la inspección de campo y en servicio incluye aplicaciones de mantenimiento y reparación. La inspección por líquidos penetrantes es especialmente importante en el mantenimiento de aviones porque muchos de los metales usados son no magnéticos. La preparación puede ser considerada como la parte más difícil e importante de la inspección por líquidos penetrantes en servicio. Esto se debe a que si existen grietas por fatiga frecuentemente están contaminadas con aceite u otros contaminantes. Si las grietas son causadas por esfuerzos de corrosión son muy finas y se encuentran contaminadas con productos de corrosión.

Partículas magnéticas.

Este tipo de END es aplicado con la finalidad de detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en una pieza de material ferromagnético.

Consiste en someter a la pieza a inspeccionar a una magnetización adecuada y espolvorear sobre la misma finas partículas de material ferromagnético. Esto último es lo que hace posible la detección de las discontinuidades.

Cuando un material ferromagnético se magnetiza, aplicando a dos partes cualesquiera del mismo los polos de un imán, se convierte en otro imán, con sus polos situados antagónicamente respecto del imán original. La formación del imán en la pieza a ensayar implica la creación en su interior de unas líneas de fuerza que van desde el polo del imán inductor al otro, pasando por una zona inerte denominada línea neutra. Estas líneas de fuerza forman un flujo magnético uniforme, si el material es uniforme.

Sin embargo, cuando existe alguna alteración en el interior del material, las líneas de fuerza se deforman o se producen polos secundarios. Estas distorsiones o polos atraen a las partículas magnéticas que se aplican en forma de polvo o suspensión en la superficie a inspeccionar y que por acumulación producen las indicaciones que se observan visualmente de manera directa o bajo luz ultravioleta.

Este método tiene la ventaja de ser un ensayo que permite una mayor sensibilidad para detectar pequeñas discontinuidades, mayor comodidad de utilización al existir la opción de utilizar equipos portátiles y en la mayoría de los casos con un bajo precio.

Los ensayos por métodos magnéticos, se basan en determinar las variaciones que introducen las perturbaciones estructurales del material sobre alguna de las propiedades magnéticas del mismo.

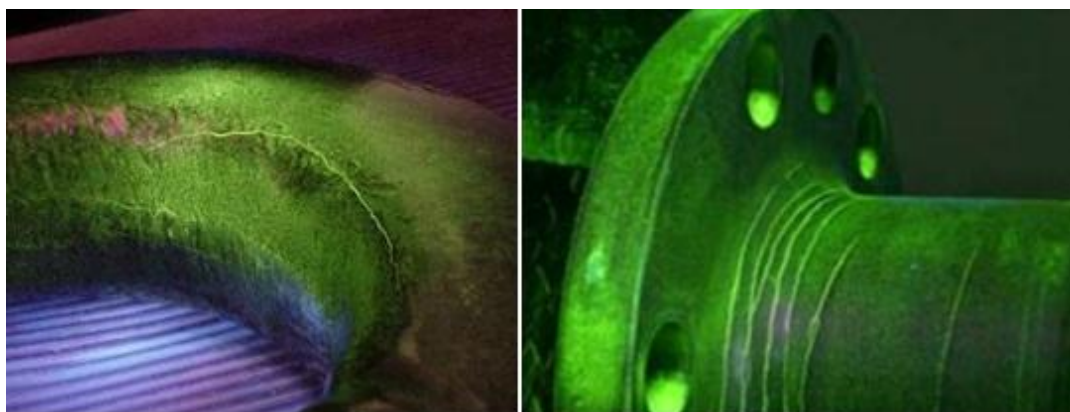


Ilustración 38. Defectos obtenidos mediante partículas magnéticas.



La secuencia de operaciones para la realización del ensayo de partículas magnéticas es el siguiente:

1. Adecuación de la superficie de la pieza a ensayar: consiste en la limpieza de la superficie a inspeccionar de forma que se eliminen las impurezas perjudiciales para el ensayo, permitiendo la interacción de las partículas con los campos de fuga, proporcionando un buen contraste entre partículas y superficie. Los métodos más empleados son:
 - Granalla de acero.
 - Cepillo de acero.
 - Disolvente.
 - Limpieza química.
2. Magnetización de la pieza.
3. Aplicación de las partículas magnéticas.
4. Observación, interpretación y evaluación de las indicaciones, con el objetivo de la obtención de registros.
5. Limpieza final.
6. Desmagnetización de la pieza, si procede.

El método de partículas magnéticas se utiliza para la detección de discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferromagnéticos tales como hierro, níquel, cobalto, etc.

Uno de los objetivos de este tipo de ensayo es la detección, lo antes posible, de discontinuidades dentro de las distintas secuencias de los procesos de fabricación, evitando que entren en servicio piezas que posteriormente serían rechazadas.

Es un método que se puede aplicar tanto a materias primas tales como perfiles y barras, como durante los procesos de conformación, mecanizado, tratamientos térmicos y electroerosión. También se puede aplicar en piezas terminadas, pero considerando que el origen de las discontinuidades se encuentra en los procesos de fabricación y durante el servicio de las piezas.



Los ensayos por partículas magnéticas se pueden categorizar como:

- Producción y elaboración primaria.
- Ensayos de fabricación y elaboración secundaria.
- Ensayos en servicio: se emplean para detectar heterogeneidades como grietas de fatiga y de sobretensión en piezas puestas ya en servicio.

Con el método de inspección por partículas se pueden detectar tres tipos de defectos:

- Defecto longitudinal.
- Defecto superficial.
- Defecto bajo la superficie o sub-superficial.

No obstante, a pesar de que el ensayo no destructivo por partículas magnéticas se realiza durante y entre operaciones de elaboración generalmente se realiza un ensayo final para asegurar que el producto terminado no tiene discontinuidades perjudiciales.

6.6. *TÉCNICAS DE INSPECCIÓN VOLUMÉTRICAS.*

En este bloque encontramos aquellos ensayos no destructivos que proporcionan información acerca de la sanidad interna de los materiales inspeccionados. Las pruebas no destructivas volumétricas son: Radiografía Industrial (RI), Emisión Acústica (EA) y Ultrasonido Industrial (UI).

Radiografía industrial.

La inspección por radiografía es un tipo de ensayo no destructivo que se basa en la absorción diferenciada de radiación de alta energía capaz de penetrar en materiales sólidos.

Esa variación en la cantidad de radiación absorbida, detectada mediante un medio, nos indicará, entre otras cosas, la existencia de una falla interna o defecto en el material.

Por tanto, este ensayo sirve para detectar discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura o configuración física de un material, y como resultado del mismo, se obtiene una imagen del interior de una pieza o componente.

Por todo ello se podría decir que el principal objetivo de la inspección radiográfica es la obtención de registros permanentes para el estudio y evaluación de imperfecciones del material.

La inspección radiográfica es uno de los métodos de inspección no destructiva más antiguos y de mayor uso en el sector industrial, por ello, se encuentra continuamente en evolución y son numerosos los desarrollos que ha sufrido esta técnica desde que empezara a usarse.



Ilustración 39. Ensayo de radiografía con equipo portátil.

La inspección por radiografía se fundamenta en la interacción entre la materia y la radiación electromagnética, siendo esta última de una longitud de onda muy corta y de alta energía. En el transcurso del ensayo, la energía de los rayos X o gamma es absorbida o atenuada al atravesar un material, dicha atenuación es directamente proporcional a la densidad, espesor y configuración del material inspeccionado.

La radiación que logra pasar a través de la pieza o componente, que es sometido a la inspección, es registrada mediante impresión en una placa o papel fotosensible que posteriormente se revela obteniendo una imagen del área inspeccionada para finalmente analizar la imagen. A groso modo lo podríamos comparar con una fotografía normal salvando la diferencia que en este caso se emplean rayos X o gamma en lugar de energía luminosa.

Los pasos que normalmente se siguen para llevar a cabo para la realización de inspecciones por radiografía son los siguientes:

La primera cosa que se debe hacer es conocer las características del material que va a ser sometido a estudio. Estas características que debemos conocer son algunas, tales como, tipo de metal, configuración, espesor del material a ser radiografiado... etc.



Estas características son observadas y estudiadas para seleccionar y determinar el tipo de radioisótopo así como el kilo voltaje más adecuado.

El segundo paso, tras la selección de la fuente de radiación, se calculan las distancias entre, la misma fuente de radiación, el objeto y la película, de este modo, y variando estas distancias podremos obtener la nitidez deseada. Además en este paso se elige también la película que deberá permitir la exposición en un tiempo razonable y una calidad de imagen óptima.

La película se coloca en un porta películas que sirve como protección para evitar que la luz dañe la emulsión fotográfica, además, el porta películas contiene pantallas intensificadoras que sirven para reducir el tiempo que la pieza debe estar ante la radiación y mejora con ello la imagen que se obtendrá.

Tras el segundo paso, se prosigue con un tercero muy importante, en este paso se pone en práctica las medidas de seguridad para la protección radiológica en la zona en la cual se efectuará la inspección radiográfica. Se trata de garantizar la protección de todo el personal que pueda encontrarse en el laboratorio o cerca de la zona.

Una vez asegurada la zona para el personal, se prosigue colocando la fuente a una cierta distancia, previamente calculada con respecto a la pieza u objeto que se va analizar, a la vez que se coloca la película radiográfica justo al lado opuesto para registrar y plasmar la radiación que logre atravesar la pieza.

Como ya anticipamos en puntos anteriores, la radiación es la causante de la impresión de la película radiográfica. A mayor cantidad de radiación recibida en la película radiográfica más se ennegrecerá ésta. Para que la imagen obtenida tenga calidad se emplean indicadores de imagen, estos indicadores, se eligen normalmente de manera que el espesor de estos represente aproximadamente el 2% del espesor de la parte a inspeccionar y siempre que sea posible se colocarán en el lado de la radiación.

La exposición radiológica se realiza por medio de rayos X o rayos gamma, para iniciar esta exposición se saca la cápsula que contiene el radioisótopo o encendiendo la máquina de rayos X. La exposición se lleva a cabo durante el tiempo previamente calculado. Una vez terminada la exposición, se recupera la cápsula o se apaga la máquina de rayos X y se extrae la película para llevarla a revelar.

Una vez revelada, si la imagen es satisfactoria, se interpreta para conocer el tipo de imperfecciones que presenta la pieza inspeccionada.

Las aplicaciones que tiene la radiografía son amplias, abarcan campos tales como el industrial, médico y la investigación. Esto es debido a que, además de que la energía de radiación puede ser absorbida por la materia, también puede hacer fosforescer ciertas sustancias.



En este caso nos centraremos en las utilidades que precisará este proyecto en las que destacan la medición de la atenuación de la radiación como se lleva a cabo para medir espesores, medición de niveles de fluidos, determinación de densidades en procesos de producción continua y la radiografía industrial que será la más importante en nuestro caso.

Cabe destacar que la corta longitud de onda que posee la radiación que se utiliza en radiografía le permite penetrar en materiales sólidos lo que permite alojar numerosas aplicaciones en el campo industrial tales como:

- Control de calidad de productos soldados, fundiciones, forjas...etc.
- Detección de defectos microscópicos como grietas, socavados, penetraciones incompletas en la raíz, etc.

Emisión acústica.

Se trata de uno de los ensayos no destructivos más recientes y que viene teniendo gran importancia a nivel mundial, aplicado a la inspección de una amplia gama de materiales y componentes estructurales.

Este método detecta cambios internos en los materiales, detecta los micro-movimientos que tienen lugar en los materiales cuando, por ejemplo, existe un cambio micro-estructural, como pueden ser las transformaciones de fase en los metales, el crecimiento de grietas, la fractura de los frágiles productos de la corrosión, deformación plástica, etc. La detección de estos mecanismos mediante ultrasonido industrial se basa en el hecho de que cuando ocurren, parte de la energía que liberan es transmitida hacia el exterior del material en forma de ondas elásticas, es decir, emiten sonido (emisión acústica). La detección de estas ondas elásticas se realiza mediante el uso de sensores piezo-eléctricos, los cuales son instalados en la superficie del material. Los sensores convierten las ondas elásticas en pulsos eléctricos y los envía hacia un sistema de adquisición de datos, en el cual se realiza el análisis de los mismos.

Es importante destacar que el método de emisión acústica solamente indica áreas con actividad acústica asociadas a la presencia de discontinuidades y no proporciona información acerca del tipo, dimensiones u orientación de la discontinuidad que genera dicha actividad acústica. Por lo tanto este método en muchas ocasiones se utiliza como técnica complementaria a otras técnicas de inspección.

Primero con el método de emisión acústica se detectan aquellas áreas con actividad acústica significativa y, posteriormente se aplica algún otro método no destructivo como el ultrasonido o las partículas magnéticas y se obtiene el detalle de la discontinuidad que generó dicha actividad acústica.



Ultrasonido industrial.

El método de ultrasonido se basa en la generación, propagación y detección de ondas elásticas (ondas sonoras de alta frecuencia) a través de los materiales para así poder detectar defectos o cambios en las propiedades de los mismos. Con este método es posible obtener una evaluación del estado interno del material en cuestión. Sin embargo, se trata de un método complejo, tanto en la práctica como en la teoría, lo cual hace necesario de personal cualificado para su aplicación y para la interpretación de resultados.

La historia del ultrasonido industrial como disciplina científica pertenece al siglo XX. En 1924, el Dr. Sokolov desarrolló las primeras técnicas de inspección empleando ondas ultrasónicas. Los experimentos iniciales se basaron en la medición de la pérdida de la intensidad de la energía acústica al propagarse en un material. Para este procedimiento se requería del empleo de un emisor y receptor de onda ultrasónica.

Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial, los ingenieros alemanes y soviéticos se dedicaron a desarrollar equipos de inspección ultrasónica para aplicaciones militares. En ese entonces la técnica seguía empleando un emisor y un receptor en la realización de los ensayos. Se la conocía como **técnica de la transparencia**.

Más tarde, en 1940 el Dr. Floy Firestone logro desarrollar el primer equipo que empleaba un mismo palpador como emisor y receptor, basando su técnica de inspección en la propiedad característica del sonido para reflejarse al alcanzar una interfase acústica, es así como nace la inspección en **pulso eco**. Este nuevo avance permitió al ultrasonido competir y en muchas ocasiones superar las limitaciones técnicas de la radiografía, ya que se podían inspeccionar piezas de gran espesor o en configuraciones que sólo permitían el acceso por un lado.

El perfeccionamiento de la inspección por ultrasonidos se debe a los investigadores alemanes Josef y Herbert Krautkramer, quienes desde 1948 se han dedicado a desarrollar y mejorar los equipos de inspección ultrasónica.

Actualmente, los equipos empleados en la técnica de ultrasonido permiten detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas, en función del tipo de palpador utilizado y de las frecuencias seleccionadas, dentro de un rango que suele variar entre 0.25 y 25 MHz.

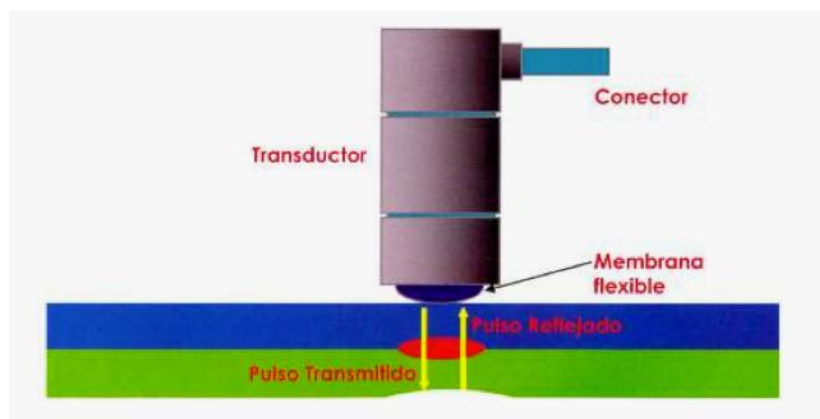


Ilustración 40. Esquema de un equipo de ultrasonido.

El examen por ultrasonido industrial se define como un procedimiento de inspección no destructiva de tipo mecánico, basado en el concepto de impedancia acústica, la cual viene dada como el producto entre la velocidad máxima de propagación del sonido en un material y la densidad del material.

Para la inspección no destructiva por ultrasonidos es necesario que las ondas ultrasónicas sean generadas por un cristal cerámico piezoeléctrico situado dentro del palpador. El elemento activo (piezoeléctrico) es el corazón del transductor y es capaz de convertir la energía eléctrica en energía acústica y viceversa. Este elemento activo es un material polarizado que tiene dos electrodos en cada una de sus caras opuestas. Cuando se hace pasar un campo eléctrico a través del material, las moléculas polarizadas se alinean siguiendo el campo eléctrico, obteniéndose como resultado la aparición de dipolos inducidos en la estructura molecular del material o cristal. Esta reordenación molecular hace que el material cambie de tamaño, produciendo la electrostricción. En materiales con polarización permanente producirá una fuerza exterior aplicada, conociéndose a este efecto como piezoeléctrico.

Los elementos activos empleados en la mayoría de los transductores son piezoeléctricos cerámicos, que según la forma en que se fabrican son capaces de producir diferentes tipos de ondas.



Ilustración 41. Sección de un transductor o palpador cerámico.



Existen dos procedimientos físicos que se emplean para generar ultrasonidos. Dichos procedimientos son el efecto **magnetoestrictivo** y el efecto **piezoeléctrico**.

El efecto **magnetoestrictivo** se basa en la propiedad que tienen los materiales ferromagnéticos de contraerse o expandirse por efecto de un campo magnético. En este tipo de materiales, además sucede la situación inversa, es decir, en un material ferromagnético se produce un campo magnético cuando es sometido a un esfuerzo de compresión o tracción. Este efecto es aprovechado para lograr altas potencias sonoras a bajas frecuencias (relativamente).

En cuanto al efecto **piezoeléctrico**, tiene una importancia mucho mayor de cara al ensayo no destructivo de materiales, de hecho este fenómeno es el que se emplea de modo casi universal como fundamento para construir los equipos. Ciertos cristales naturales o sintetizados tienen la propiedad de generar cargas eléctricas en su superficie en presencia de un esfuerzo de tracción o compresión. La carga cambia de signo cuando se invierte la dirección del esfuerzo. Del mismo modo en las superficies de un cristal expuesto alternativamente a un esfuerzo de tracción y a un esfuerzo de compresión existe un potencial alternativamente positivo y negativo, es decir, una tensión alterna.

El efecto piezoeléctrico es reversible, es decir, cuando se aplica carga eléctrica a la superficie del cristal, esta se contrae o se expande según el signo de la carga eléctrica. Una tensión eléctrica alterna, aplicada a las superficies del cristal, da origen a ondas mecánicas de presión, esto es, a expansiones y contracciones. De la reversibilidad se extrae que el mismo principio puede emplearse para generar y detectar ondas longitudinales ultrasónicas. En la mayoría de los casos se utiliza un mismo cristal como emisor y receptor.

El efecto piezoeléctrico no es propio de todos los cristales y solo se produce en determinadas condiciones.

Una vez explicados los dos procedimientos físicos existentes más característicos para generar ondas ultrasónicas, procedemos a explicar el procedimiento del ensayo por ultrasonidos. Existen dos procedimientos de ensay, basados en el seguimiento de la parte transmitida de la onda o de la parte reflejada.

Cuando se evalúa la parte del ultrasonido que ha sido transmitida a través de la pieza que se ensaya, se trata de un **procedimiento por transmisión**. En este proceso, a un lado de la pieza se aplica un emisor de sonido y al otro lado, un receptor. En presencia de un defecto, la intensidad sonora en el receptor disminuye a causa de la reflexión parcial o se hace nula en caso de reflexión total. Una de las principales limitaciones que presenta este método es que no se puede determinar la profundidad a la que está localizado el defecto en la pieza.



En cuanto al procedimiento **pulso-eco**, que también se denomina de pulsos o impulsos reflejados, utiliza la parte del sonido que se refleja para la evaluación de defectos. El oscilador piezoeléctrico funciona a la vez como emisor y como receptor. Como la energía recibida es mucho más débil que la emitida, aquí no puede operarse sobre la base, empleándose exclusivamente impulsos de sonido. Un impulso eléctrico de muy corta duración genera una análoga onda ultrasónica. Inmediatamente después, mientras aún se está propagando la onda, el mismo oscilador está listo para la recepción. La onda sonora penetra en el material, hasta que, como resultado de una superficie límite, tiene lugar una reflexión parcial o total.

Además de los procedimientos señalados, es importante señalar, aunque sin entrar en detalles, que existen otros dos procedimientos de ensayo. Dichos procesos, si bien no se pueden realizar con los equipos ordinarios de pulso-eco, tienen su importancia. Estos procesos son el procedimiento por **resonancia** y el de **modulación de frecuencias**.

El ensayo no destructivo por ultrasonido industrial es frecuente para la medición de espesores, detección de zonas de corrosión, detección de defectos en piezas que han sido fundidas, forjadas, laminadas o soldadas. En las aplicaciones de nuevos materiales como son los metales cerámicos y los materiales compuestos, ha tenido una gran aceptación, por lo sencillo y fácil de aplicar como método de inspección para el control de calidad. Gracias al uso de sistemas informáticos se han ampliado y mejorado sus campos de aplicación, gracias a que es posible el análisis inmediato y detallado de la información obtenida.

Debemos destacar que, a la hora de realizar un ensayo por ultrasonido, debemos tener en cuenta que los materiales a analizar deben de presentar una serie de características para que el ensayo sea viable en cuanto a aplicación y posterior evaluación:

- Sensibilidad alta: materiales que permitan detectar muy pequeñas discontinuidades e imperfecciones.
- Poder de penetración: permiten inspeccionar piezas de espesores elevados.
- Exactitud: a la hora de determinar posición y tamaño de los posibles defectos encontrados.
- Rapidez de respuesta.
- Accesibilidad en cuanto a la superficie a ensayar.



6.7. OTRAS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVAS.

Termografía.

La termografía es un método de inspección no destructiva en la que no hay contacto, y que permite detectar defectos sub-superficiales a través de la obtención de una imagen de la distribución de temperaturas de los cuerpos, la cual se denomina termograma.

El termograma se obtiene mediante la captación de la radiación infrarroja que emite el cuerpo a ensayar por el hecho de encontrarse a una temperatura superior al cero absoluto (-273°C) y cuya longitud de onda depende de la temperatura a la que se encuentre dicho cuerpo.

Esta radiación se convierte en una imagen radiométrica que permite visualizar e interpretar los datos de temperaturas superficiales de la pieza a inspeccionar mediante los correspondientes algoritmos.

En este ensayo el equipo utilizado es la cámara termográfica, cuya misión es registrar la emisión natural de radiación infrarroja procedente de un objeto y generar una imagen térmica.

La cámara se debe colocar delante del objeto a inspeccionar para que ésta reciba la energía infrarroja emitida.

Esa energía es la suma de los tres componentes explicados a continuación:

- La energía infrarroja, proveniente del objeto.
- La energía reflejada por dicho objeto.
- La energía emitida por el ambiente.

Mediante un sistema de lentes colocado sobre un detector de infrarrojos, la cámara recibe esta energía. La información se trata electrónicamente para ser transformada en una imagen de temperaturas, que puede ser vista en un monitor de vídeo o en una pantalla LCD.

En estos termogramas, cada píxel de la imagen está asociado a un color o nivel de gris, el cual representa una temperatura dada de acuerdo con una escala predeterminada, que puede ser monocromática o policromática.

Una vez escogida la escala, a partir de estos patrones térmicos, reconocibles a simple vista o por medio del procesamiento de la imagen, se permite la identificación de los fallos a tiempo real.



Ilustración 42. Inspección mediante cámaras termográficas.

En función de si se utiliza o no una fuente de excitación para producir el flujo de calor, esta técnica se puede clasificar de la siguiente manera:

- Termografía activa: existen diferentes técnicas de termografía activa.
 - Termografía activa pulsada.
 - Termografía de pulso largo o *Step Heating*.
 - Termografía lock-in.
- Termografía pasiva.

El procedimiento para proceder con el análisis no destructivo es el siguiente:

1. Preparación del equipo: La calibración del equipo es una de las operaciones fundamentales previas al examen termográfico. Se utilizan para ello una fuente de radiación o simulador de cuerpo negro. También es importante tener en cuenta funciones de corrección para incluir efectos ambientales, tales como la atenuación atmosférica (función de la distancia entre el equipo y la pieza a analizar) y la corrección debida a la emisividad.

La calibración debe incluir el intervalo de temperaturas más amplio posible. Otro aspecto que debe considerarse es que la zona observada por el visor de la cámara no tiene porqué coincidir exactamente con la zona espectral analizada por el sensor térmico. Un método para aumentar la precisión consiste en introducir lo más próxima posible a la pieza a medir, una referencia de emisividad conocida.



2. Elección de la técnica correcta: debido al gran número de técnicas existentes, habrá que escoger correctamente el método más idóneo para la aplicación en cuestión.
3. Parámetros que se deben controlar:
 - Resolución térmica: para determinar la mínima diferencia de temperaturas que se puede medir.
 - Resolución espacial de la imagen o campo de visión instantáneo.
 - Medida de la resolución espacial, a través de una rendija normalizada.

Este método está ampliamente ligado a la detección de posibles defectos que generen pérdidas de calor sobre todo en el campo de la industria.

La termografía infrarroja es un ensayo de tipo no destructivo muy flexible debido a que no implica ningún contacto entre la pieza a inspeccionar y el equipo que realiza la inspección.

A continuación se nombran las aplicaciones más comunes para este tipo de ensayo:

- Análisis dinámico de fatiga.
- Evaluación de uniones en metales.
- Descubrimiento de corrosión oculta.
- Inspección de fuselajes de avión.
- Evaluación de la soldadura por puntos.
- Falta de adhesión en materiales compuestos.
- Daños por impacto en materiales compuestos.
- Medida del espesor en materiales compuestos.
- Porosidad en materiales compuestos.
- Adherencia de parche en materiales compuestos.
- Pérdida de espesor.
- Adherencia de pintura.
- Corrosión bajo pintura.



Corrientes de Eddy.

El término de corrientes inducidas o corrientes Eddy comenzó a utilizarse sobre el año 1824 con Dambey Argo y Jean-Baptiste Foucault, pero su primera aplicación para ensayos no destructivos data de 1879, con D. E. Hughes, quien las empleó para diferenciar tamaños, formas y composiciones de diferentes metales y aleaciones. Sin embargo, no fue hasta el año 1948 cuando el Instituto Reutlingen de Alemania, empezó el desarrollo de la actual instrumentación de corrientes de Eddy.

Este método, en el que no se requiere contacto eléctrico directo con la parte a inspeccionar, opera bajo el principio de la inducción electromagnética, y consiste en hacer pasar una corriente alterna por un solenoide, la cual genera un campo magnético.

Al colocar la pieza a inspeccionar en dirección perpendicular al campo creado por el solenoide, se generan corrientes inducidas circulares en la pieza. Dichas corrientes inducidas van a producir un campo magnético (secundario), que se opone al campo magnético del solenoide (primario) y modificará la impedancia de la bobina. Esta variación de la corriente eléctrica que circula por la bobina es el parámetro que se medirá y registrará. Las discontinuidades o defectos que existan en la pieza interrumpirán las corrientes de Eddy, y esto provocará que el campo magnético producido por estas corrientes sea menor.

El patrón de corrientes inducidas y el campo magnético, que necesariamente está asociado a estas corrientes, están influenciados por diferentes características del material bajo prueba. Estas características pueden agruparse en tres grupos:

- Detección de discontinuidades: la detección de discontinuidades se refiere a la localización de grietas, corrosión, erosión y/o daños mecánicos en la superficie de las piezas.
- Propiedades de materiales: utilizando las corrientes inducidas, se pueden determinar propiedades de materiales, se incluyen mediciones de conductividad, permeabilidad, dureza, clasificación de aleaciones y otras condiciones metalográficas que requieren junto con las propiedades ya mencionadas equipos y arreglos de bobinas especiales.
- Mediciones dimensionales: las mediciones dimensionales comúnmente realizadas mediante la aplicación de corrientes inducidas, son la medición de espesores, con buena exactitud para espesores pequeños teniendo la desventaja de no ser precisos en espesores grandes, medición de espesores de revestimientos como pinturas o películas aislantes.

Para poder realizar la inspección por corrientes inducidas o de Eddy, se deberá rodear la pieza con una bobina de inducción.

Las corrientes inducidas en la pieza circulan en bucles cuya magnitud y fase dependen:

- Del campo magnético establecido por las corrientes eléctricas de la bobina.
- De las propiedades eléctricas de la pieza.
- De los campos electromagnéticos inducidos en la pieza.
- De la presencia de defectos y/o discontinuidades.

Los equipos de medida empleados varían en complejidad según los requerimientos de inspección, aunque comúnmente pueden:

- Generar las corrientes en la bobina.
- Modular la señal de salida de la corriente de excitación.
- Procesar y amplificar la señal inducida en la pieza.
- Desmodular la señal inducida.
- Registrar y representar la señal inducida.

Además, los equipos deben incluir los útiles para sujetar las piezas ensayadas y las bobinas de inducción, así como su manipulación y posicionamiento.



Ilustración 43. Ejemplo de equipo para analizar corrientes inducidas.

Las frecuencias utilizadas generalmente varían entre 200 Hz y 6 MHz, dependiendo del espesor del material, la profundidad de penetración, sensibilidad y resolución requeridas, además del propósito de la propia inspección.



Actualmente es posible disponer de equipos que realizan barridos de frecuencia (técnicas multifrecuencia secuenciales) o aplicando directamente varias señales de diferente frecuencia (técnicas multifrecuencia en continuo).

En principio, cualquier discontinuidad puede ser detectada a través de este ensayo, pues todas alteran el flujo del campo magnético de la pieza ensayada. Para el caso de tubos, es fácil detectar defectos (tanto longitudinales como radiales), aunque sí que es más complicado diferenciar entre defectos similares situados a distinta profundidad, por lo que será necesario utilizar equipos especialmente diseñados para ello. En ciertos defectos laminares característicos de tubos soldados, la alteración es de muy pequeña intensidad, sobre todo si está orientada perpendicularmente al eje del tubo.

Para conseguir que la medida sea útil y consistente es necesario establecer de forma precisa y correcta la sensibilidad del equipo, para lo cual se suelen utilizar patrones con las indicaciones claramente medidas.

Las aplicaciones más comunes para este ensayo son las siguientes:

- Medir o identificar condiciones o propiedades tales como: conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, tamaño de grano, condición de tratamiento térmico, dureza y dimensiones físicas de los materiales.
- Detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales, como costuras, grietas, porosidades e inclusiones.
- Detectar irregularidades en la estructura del material.
- Medir espesores de un recubrimiento no conductor sobre un metal conductor, o espesores de un recubrimiento metálico no magnético sobre un metal magnético.

Sin embargo, debido a que el ensayo de corrientes inducidas es sensible a cualquier variable que afecte al flujo de corriente inducida y existe una gran variedad de aplicaciones, lo clasificaremos en función de la variable que se evalúe:

- La sensibilidad a la conductividad del material permite:
 - Clasificar aleaciones.
 - Controlar tratamientos térmicos: tamaño de grano, dureza, esfuerzos residuales.
 - Medir espesores tanto de recubrimientos como de pinturas.



- La sensibilidad a la permeabilidad magnética permite:
 - Clasificar aleaciones.
 - Evaluar tratamientos térmicos de materiales magnéticos.
 - Medir espesores de tratamientos superficiales.
- La sensibilidad a la homogeneidad geométrica del material permite:
 - Medir espesores de materiales delgados.
 - Detectar heterogeneidades como grietas, inclusiones, segregaciones, costuras, picaduras por corrosión, etc.
- La sensibilidad al acoplamiento magnético permite:
 - Medir espesores de materiales no metálicos o aislantes.
 - Medir diámetros.
 - Medir el espaciamiento entre placas metálicas.

Ensayo no destructivo por vibraciones.

Como ya sabemos, las vibraciones son resultado de la transmisión de fuerzas lo que provoca el desgaste y deterioro de las máquinas. Las vibraciones pueden salir al exterior, mediante apoyos, uniones, etc. De este modo, si las fuerzas de excitación se mantienen constantes entre unos límites, el nivel de vibración medido se mantiene dentro de los mismos límites proporcionalmente.

Cuando los defectos comienzan a aparecer, los procesos dinámicos de la máquina son alterados, alterándose las fuerzas que, como resultado, darán una modificación al espectro de vibración.

El principal objetivo del mantenimiento es garantizar que la máquina opere en perfectas condiciones. La misión consiste en detectar posibles problemas antes de que ocurran grandes averías.

Los ensayos de vibración, son uno de los ensayos más solicitados especialmente en industrias como electrónica, automoción, aeronáutica, aeroespacial y aplicaciones militares dado que en todos estos campos es habitual que el producto esté sometido a vibraciones durante su vida útil.



Los principios en lo que se basan este tipo de análisis son los siguientes:

- Toda máquina en su correcto estado de funcionamiento, tiene vibraciones debido a las imperfecciones que esta presenta de fábrica. Este nivel de vibraciones puede considerarse como nivel de referencia de su funcionamiento satisfactorio.
- Cualquier defecto en la máquina supone un incremento en la vibración perfectamente detectable.
- Cada defecto, lleva asociado, cambios específicos en las vibraciones con lo que se puede identificar el tipo de fallo.

6.8. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS.

La selección del método de ensayo que se va a emplear en cada caso es fundamental, ya que una elección correcta permitirá detectar de una forma segura, rápida, eficaz y a un coste razonable los posibles defectos de un componente o pieza.

La selección del método de ensayo depende de la finalidad que se busque, por lo que será necesario seleccionar entre ellos, el que mejor se adapte para cada caso, aplicando el procedimiento más adecuado.

De forma general, podremos decidir que método emplear en función de donde se encuentren los defectos, si en el o en el exterior:

- Métodos para obtener información de la superficie o cerca de ella: ensayo visual, ensayo de líquidos penetrantes, ensayo de partículas magnéticas y ensayo de corrientes inducidas.
- Métodos para obtener información en el interior de los objetos: ensayo radiográfico, ensayo por ultrasonidos, ensayo por vibraciones y ensayo termográfico.

También, podemos distinguir los métodos dependiendo del estado en el que se encuentran los dispositivos que se van a ensayar, así pues:

- Métodos que se emplean para obtener información en situaciones estáticas: inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, corrientes inducidas, ensayo de fugas y termografía.
- Métodos que se emplean para obtener información de los sistemas que se encuentran en movimiento (dinámica): ultrasonido industrial y ensayo de fugas.



7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

7.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

En el presente proyecto, se realiza el diseño de un eje ferroviario de mercancías para su posterior estudio a fatiga. Mediante el análisis del eje a fatiga, lo que se pretende conocer es la variación en cuanto a la vida del eje en el momento en el que aparece una grieta en la sección más crítica de dicho eje.

Tanto para el diseño como para el análisis a fatiga del eje, se va a hacer uso del software de diseño **Pro/ENGINEER**, válido para el modelado 3D, así como para analizar el comportamiento a fatiga, en este caso, de un eje ferroviario, así como de la presencia de fisuras durante la vida en servicio del mismo.

Como se menciona antes, el eje ferroviario sometido a estudio se corresponde con uno de los ejes de vagón de mercancías, es decir, con un eje no tractor.

En lo que se refiere al diseño del eje, se ha de remarcar que se parte de un eje que ya ha sido utilizado en un proyecto previo [4] para el estudio de un conjunto ferroviario mediante el software de diseño mencionado anteriormente.

Además, mediante la introducción de determinadas variables, se intentará reproducir lo más aproximado posible a un caso verídico. Para ello, se ha seleccionado un tipo de acero utilizado para la fabricación de ejes ferroviarios, cuyas condiciones se detallan en los posteriores apartados del proyecto.

Los análisis estáticos y análisis a fatiga a los que va a estar sometido el eje, se van a realizar en las secciones críticas del mismo, donde serán mayores los esfuerzos producidos. Estas secciones serán los cambios de sección.

Finalmente, se ha de remarcar que mediante el estudio a fatiga del eje descrito, se pretenden obtener una serie de resultados a partir de los cuales se determinará la variación de vida que sufre el eje en el momento en que durante su funcionamiento se origina una grieta.



7.2. HERRAMIENTAS A UTILIZAR.

El objetivo principal de este trabajo es realizar el análisis mediante el software Pro/ENGINEER Wildfire 5.0., utilizar este programa para el diseño, análisis estático y simulación a fatiga del eje ferroviario descrito anteriormente. Debido a la reciente implantación en la Universidad Carlos III de Leganés de este software, se ha decidido realizar algunos estudios previos para corroborar la veracidad de los resultados obtenidos.

Pro/ENGINEER Wildfire 5.0

Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 es un software de diseño paramétrico potentes prestaciones integradas en diseño 3D, análisis y fabricación. Una de sus principales ventajas es que las aplicaciones integradas permiten desarrollar todo el proceso desde la concepción hasta la fabricación de una pieza o componente.

Pro/ENGINEER ofrece amplias prestaciones en diseño y análisis, con la finalidad de reducir los errores, ahorrar tiempo y reducir costes debidos al uso de distintas herramientas sin conexión entre sí.

El presente apartado del proyecto que se estudia, se realiza una descripción inicial de la herramienta informática mencionada para, posteriormente, explicar de manera clara y detallada las herramientas que se han usado para el diseño y análisis del eje ferroviario. Estas son el módulo *Estándar* y el módulo *Mechanica*.

CARACTERÍSTICAS DE Pro/ENGINEER

Pro/ENGINEER es un software que pertenece a la categoría de CAD/CAM/CAE, y sus capacidades y sus características se pueden dividir principalmente en tres bloques que se explican a continuación.

- **Diseño:** Pro/ENGINEER ofrece una amplia variedad de herramientas que hacen posible la generación de una representación digital completa del producto que está siendo diseñado. Entre las prestaciones completas de geometría también se incluye el modelado de sólidos, chapa y conjuntos, creación de superficies técnicas y de forma libre, piezas soldadas, estructuras metálicas y mecanismos.
- **Análisis:** los posibles análisis que el software es capaz de realizar son muy extensos, pudiéndose realizar análisis térmicos, estáticos, dinámicos y de fatiga. Además, Pro/ENGINEER ofrece la oportunidad de aplicar a los análisis, mediante el uso de herramientas para ayudar al desarrollo del producto, factores adicionales como pueden ser, factores humanos, tolerancias de fabricación o flujo de molde.
- **Manufactura:** esta característica que ofrece Pro/ENGINEER reside en las soluciones de Control Numérico, permitiendo a los fabricantes crear herramientas,



trayectorias de herramientas de CN y programas de inspección mientras se realiza el trabajo de diseño de productos.

VENTAJAS DE Pro/ENGINEER Wildfire 5.0

El paquete Pro/ENGINEER simplifica las complejidades del entorno de desarrollo de productos actual con herramientas intuitivas y fáciles de usar que funcionan conjuntamente sin dificultades para llevar a cabo el trabajo.

- Permite que los equipos trabajen simultáneamente en los mismos diseños de productos.
- Fomenta un mayor grado de reutilización de los diseños mientras se mejoran los estándares de calidad.
- Da lugar a un proceso estándar y automatizado de cambios de ingeniería que permite:
 1. Recopilar los cambios relacionados.
 2. Realizar análisis sencillos y precisos en todas las piezas afectadas.
 3. Proporcionar distribución y notificación de los cambios a los equipos de productos

FUNCIONES Y ESPECIFICACIONES

- Prestaciones CAD 3D de Pro/ENGINEER:
 - Permite crear rápidamente productos de gran calidad con una amplia gama de funciones básicas de modelado, creación de planos 2D y 3D, chapa, soldadura y modelado de superficies entre otros.
 - Permite aumentar la calidad de los modelos, fomentar la reutilización de piezas y reducción de los errores en los modelos.
 - Reduce los costes disminuyendo la proliferación de nuevos números de pieza.
 - Responde a las necesidades de creación de superficies complejas.
 - Permite crear formas innovadoras imposibles de obtener con otras herramientas CAD 3D de menor calidad.
 - Posibilita la conexión con la información y los recursos existentes en Internet para conseguir un proceso de desarrollo de productos con un alto nivel de eficiencia.



- Pro/ENGINEER Advanced Assembly:
 - Presenta la opción de compartir y gestionar datos de diseño de conjuntos con mayor eficiencia utilizando interfaces predefinidas de modelos de esqueleto.
 - Define y automatiza la aplicación de reglas de diseño para que sólo se creen las relaciones adecuadas en el contexto de los diseños, lo que hará que éstos puedan ser modificados y reutilizados con facilidad.
 - Desarrolla pasos secuenciales exclusivos para generar modelos, vistas y listas LDM independientes en cada paso del proceso del conjunto.
 - Permite proteger la propiedad intelectual con la tecnología Shrinkwrap™ technology.
- Pro/ENGINEER Interactive Surface Design:
 - Presenta la posibilidad de utilizar esbozos de conceptos 2D como referencia visual “aproximada” en la creación de los modelos 3D. Conceptualmente se comienza por el desarrollo de la geometría desde cero o a partir de un esbozo, de conjuntos de escaneado o de otros datos de referencia y a continuación, se desarrollan gradualmente los conceptos hasta obtener un modelo de producción.
 - Incorpora la posibilidad de trabajar con una ventana de modelado única con cuatro cuadrantes que permite crear, manipular y controlar directamente las curvas, las superficies y las conexiones.
 - Pueden crearse y modificarse superficies complejas arrastrando los puntos de control de las curvas sin perder la continuidad G2.
- Pro/ENGINEER Mechanism Dynamics:
 - Obtención de datos precisos del análisis dinámico de muelles, levas, amortiguadores o impactos mediante la incorporación de las masas de inercia reales de los componentes y las fuerzas que actúan sobre y entre ellos.
 - Crea animaciones de mecanismos en acción y pudiéndose visualizar cómo las fuerzas dinámicas, la aceleración y la velocidad afectan al modelo del producto digital con la ayuda de flechas de vectores codificadas con colores.
 - Lleva a cabo diversos tipos de análisis, entre los que se incluyen el de estado estático o estable (reposo), el dinámico (cálculo de la fuerza frente al tiempo) y el de equilibrio de fuerzas (determinación de la fuerza requerida para mantener la configuración deseada del mecanismo).



- Pro/ENGINEER Piping and Cabling:
 - Creación de todos los diagramas 2D y 3D de cableado y tuberías en una única solución.
 - Cálculo de las propiedades de masa y generación automática de listas de hilos, mazos aplanados y LDM personalizables.
 - Evaluación de las posibilidades de mecanizado y las interferencias de las tuberías.
- Pro/ENGINEER Behavioral Modeling:
 - Evalúe la sensibilidad del modelo para conocer los efectos de los cambios en los objetivos de diseño.
 - Genere automáticamente un conjunto de soluciones viables para problemas de diseño con varios objetivos.
 - Integre los resultados con el software de simulación de Pro/ENGINEER o con otras aplicaciones externas.
- Sistema de prototipado rápido:

Otra de las características más interesantes que posee este software, es la posibilidad de reproducir modelos y prototipos directamente a partir del modelo sólido en 3D, generando archivos en formato STL. Este formato aproxima el modelo sólido por pequeños triángulos o facetas, y el sistema de prototipado rápido genera la pieza a partir de la unión aditiva de líquidos, capa por capa, a partir de secciones transversales de la pieza obtenidas del modelo 3D.
- Compatibilidad de los datos:
 - Soporte del Kernel para ACIS™, Parasolid™ y Granite®.
 - Compatibilidad de Associative Topology Bus™ para Pro/ENGINEER.
 - Conversores directos para CADDs y DWG de AutoCAD®.
 - Conversores estándar: DXF de AutoCAD®, IGES, STEP, SET, VDA, ECAD, CGM, COSMOS/M, PATRAN® y ficheros de geometría SUPERTAB™, SLA, JPEG, TIFF, RENDER, VRML.
 - La compatibilidad con Mathcad, el software de cálculo de ingeniería de PTC, permite integrar las hojas de trabajo de Mathcad con el diseño para predecir el comportamiento y determinar los parámetros y las cotas esenciales.



- Reparación de datos importados:
 - Reduzca el tiempo y el esfuerzo necesario para limpiar los datos de diseños importados o antiguos.
 - Contraiga la geometría importada para controlar mejor las superficies con el gestor de restricciones.
- Windchill ProjectLink:
 - Espacios de trabajo de proyectos en línea basados en Web y seguros donde los clientes, los proveedores y los integrantes de equipos globalmente dispersos pueden trabajar de manera conjunta en los proyectos.
 - Gestión de proyectos en línea que permite hacer un seguimiento de los hitos, los elementos subsecuentes, los programas y los recursos de los proyectos.
 - Almacén central para toda la información relacionada con el proyecto.
 - Visualización incorporada con presentación y anotación de múltiples formatos de CAD y PDF.
 - Automatización de procesos gobernada por plantillas de procesos empresariales clave como NPI y Seis Sigma.
 - Diseñado para trabajar con herramientas cotidianas y familiares, como diversos paquetes CAD, Microsoft Office y Microsoft Project.
- Windchill PDMLink:
 - Creación de una fuente única, segura y basada en Web de datos del producto para toda la empresa, con reasignación, revisión, gestión de la estructura, búsqueda y gestión del ciclo de vida.
 - Visualización incorporada a través de Product View Lite para ver y anotar múltiples formatos de CAD y PDF.
 - Gestión de datos robusta para Pro/ENGINEER, así como múltiples herramientas CAD mecánicas y eléctricas, código fuente de software y documentos.
 - Gestión de cambios de vía completa y rápida lista para usar.
 - Gestión de la configuración que proporciona todas las vistas requeridas de la información del producto.



- Integración robusta con ERP y otros sistemas empresariales, con el módulo opcional Windchill Enterprise Systems Integration (ESI).
- Pro/INTRALINK:
 - Proporciona una gestión de datos de Pro/ENGINEER completa, avanzada y fiable sobre una moderna arquitectura Windchill.
 - Admite la ingeniería simultánea.
 - Proporciona herramientas de reasignación (archivo, extracción y líneas base) y herramientas de creación de informes.
 - Ofrece soporte continuado para implementaciones en varios sitios con las herramientas de replicación de Pro/INTRALINK.
 - Como subconjunto de Windchill PDMLink, ofrece una ruta de ampliación a prestaciones más completas de gestión de datos y control de procesos.



7.3. SIMPLIFICACIONES REALIZADAS.

Para los estudios comentados previamente, se realizarán las siguientes simplificaciones:

- Debido a que el eje que se estudia es un eje no tractor, no dispone de coronas de transmisión y no estará sometido a momentos flectores. La disposición de las cargas a las que estará sometido el eje ferroviario, se explicarán en apartados posteriores.
- Se supondrá una velocidad de avance constante del convoy para el estudio de fatiga. De esta forma se desprecian los efectos de aceleración y frenado y también se desprecian los esfuerzos en la dirección del avance.
- Para no tener en cuenta los desniveles del terreno por el que circula el convoy y los tramos con presencia de curvas, se considerará que el tren de mercancías circula por un tramo recto.
- No se considerará el efecto de la temperatura en el eje.
- Se supondrá que la grieta que aparece en el eje tiene una longitud inicial de 0,5 mm. Esta simplificación es debida a que Pro/ENGINEER no detecta grietas cuya longitud mínima no sea mayor o igual que 0,5 mm.
- El material utilizado para el estudio del eje es acero 25CrMo4 o EA4T. Se trata de un tipo de acero utilizado en la fabricación de ejes ferroviarios, similar al A1N.
- Con el objetivo de obtener resultados en un menor número de ecuaciones y reducir el tiempo de cálculo, se hará uso de la aplicación simetría que proporciona el programa. Esta simplificación, por ser la más importante, se demostrará detalladamente en un capítulo posterior.

7.4. CARACTERIZACIÓN DEL EJE FERROVIARIO.

7.4.1. DEFINICIÓN DEL MATERIAL.

La primera intención fue realizar el estudio con acero al carbono templado A1N, un acero muy empleado en el sector ferroviario para la fabricación de ejes según la UNE-EN13260 de Diciembre 2010, pero debido a la dificultad para encontrar curvas experimentales a-N de dicho acero, se decidió emplear el acero 25CrMo4 de baja aleación y laminado en caliente, un acero con unas propiedades bastante similares al A1N y del cual sí se pudieron obtener dichas curvas.

Resistencia a tracción última = 656 MPa.

Límite elástico = 490 MPa.

Módulo de Young = 205 GPa.

Densidad = 7850 kg/m³

7.5. MODELADO DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS.

En el presente apartado se explica el desarrollo en Pro/ENGINEER del eje ferroviario, además de la geometría de la grieta que se originará en el eje.

7.5.1. MODELADO DEL EJE.

Primeramente, en el módulo *Estándar*, se realiza el perfil de revolución. Se comienza realizando, mediante la función *esbozo*, la sección en el plano deseado que se quiere revolucionar. La siguiente figura muestra el esbozo de la sección del eje con sus correspondientes cotas.

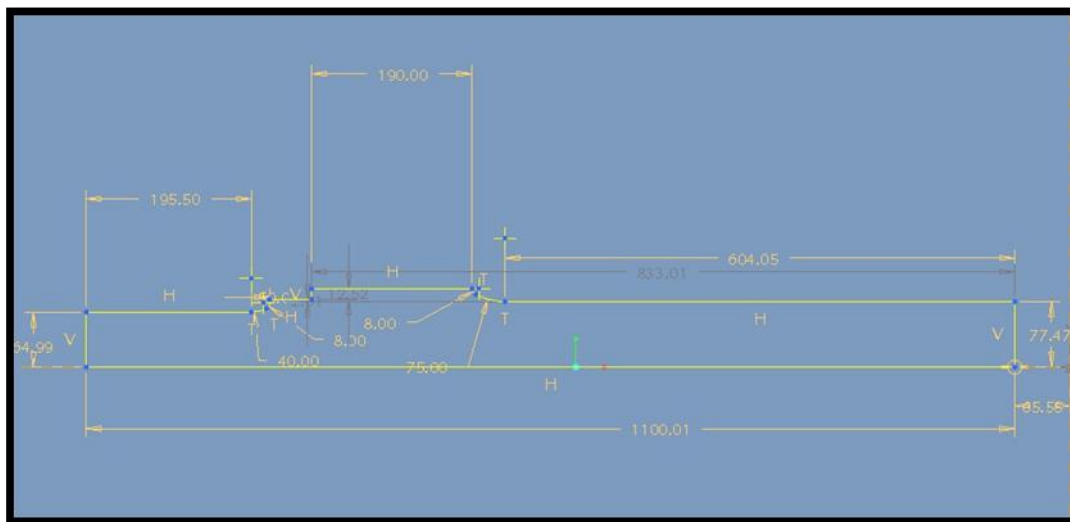


Ilustración 44. Perfil de revolución del eje acotado.

Una vez finalizado el esbozo, se define el eje de revolución del eje para generar la figura. Como se aprecia en la siguiente figura, se selecciona el eje x como eje de revolución para generar el eje.

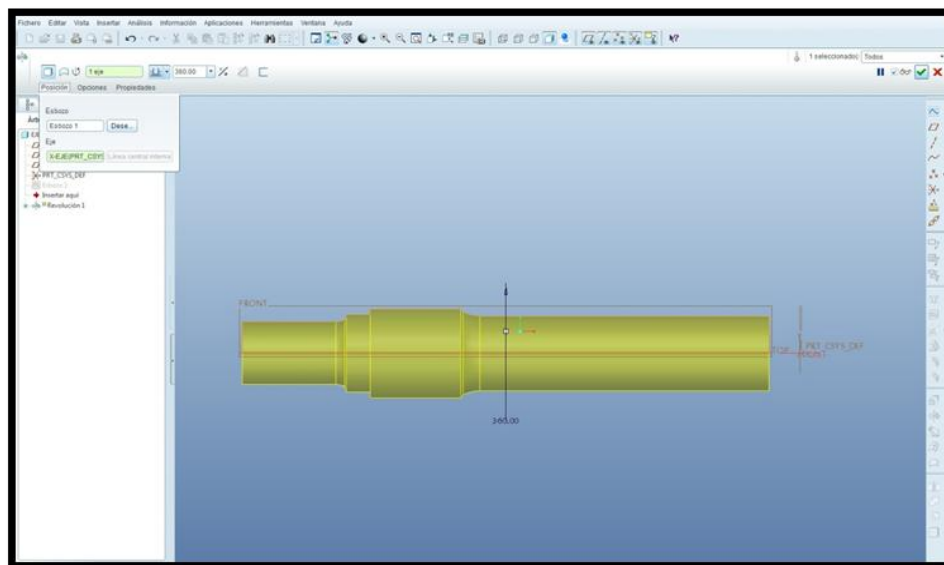


Ilustración 45. Revolución de la sección del eje.

Por último, se realizan los redondeos y los chaflanes en los cambios de sección. Para elaborar los redondeos y chaflanes se pulsa la herramienta *Insertar Redondeo* e *Insertar chaflán*.

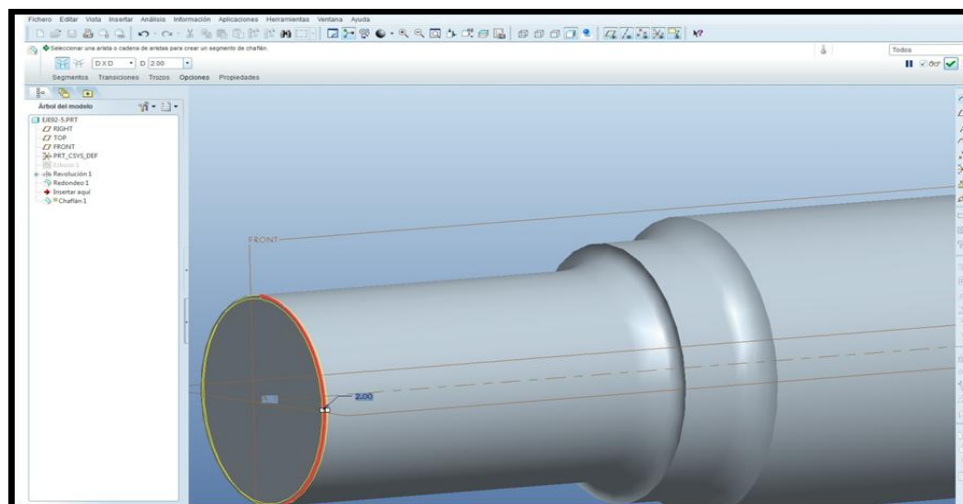


Ilustración 46. Generación del chaflán.

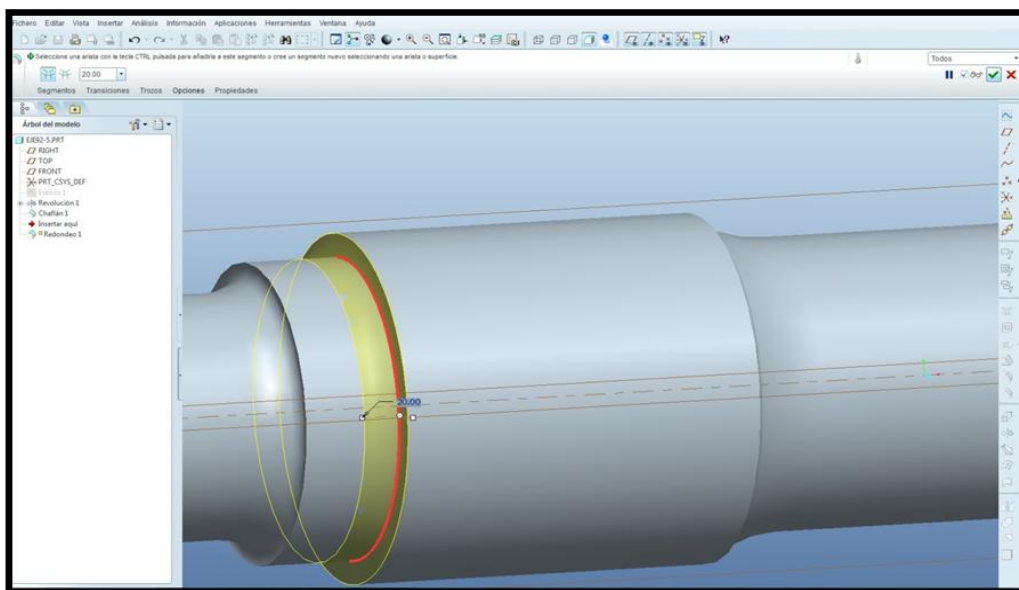


Ilustración 47. Generación del redondeo.

Aunque es suficiente con elaborar sólo la mitad del eje, porque es lo que se va a someter posteriormente a estudio, mediante la herramienta *Simetría* realizaremos una copia exacta de las operaciones que se han realizado para obtener el eje ferroviario que se someterá al posterior estudio.

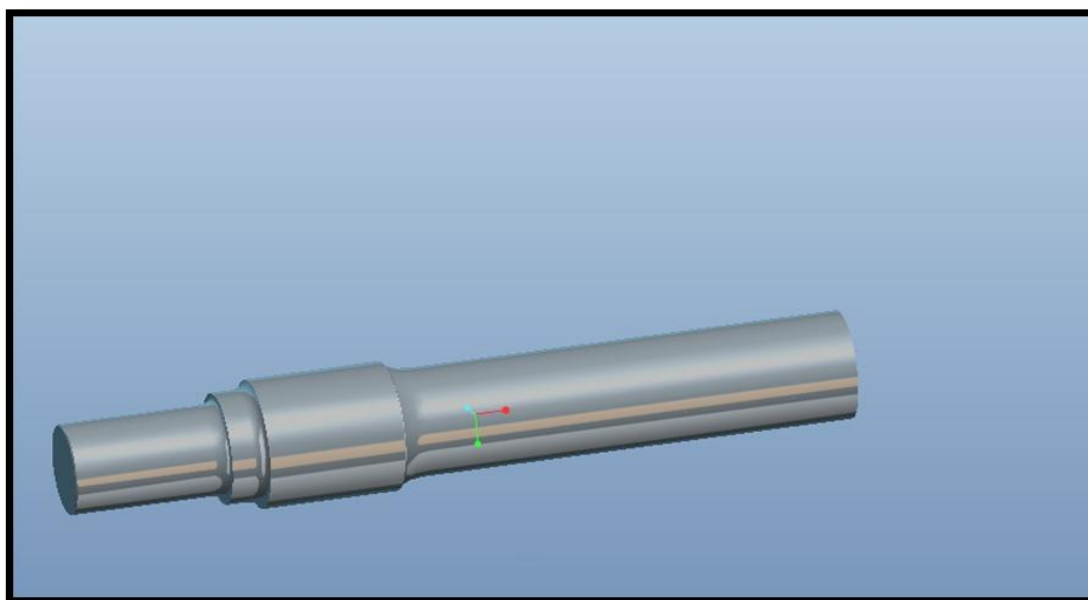


Ilustración 48. Mitad del eje.

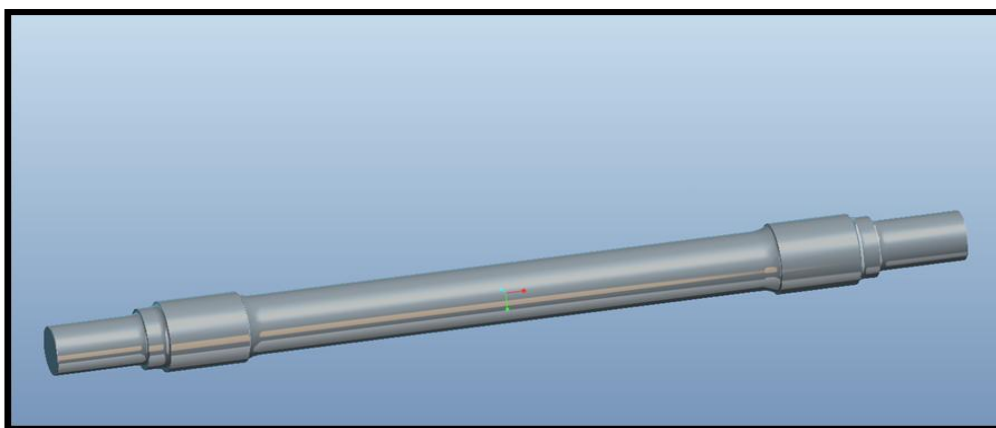


Ilustración 49. Eje completo después de realizar la simetría.

7.5.2. DEFINICIÓN Y GEOMETRÍA DE LAS GRIETAS.

Una vez realizado el análisis a fatiga del eje inicial, se le practica una grieta de una longitud inicial de 0,5 mm, que posteriormente se irá aumentando hasta un valor de longitud final que variará dependiendo del estudio realizado.

Este aumento de longitud de la grieta se ha tenido que realizar manualmente debido a que el programa no es capaz de hacerlo automáticamente. Para ello, se le ha practicado inicialmente la grieta de 0,5 mm de longitud, y se ha procedido con el ensayo, anotando los resultados obtenidos. Después se le aumenta la longitud de la grieta variando a su vez los ciclos de carga, y se vuelve a analizar el eje. De este modo se simula que la grieta va aumentando su longitud a lo largo de la vida en servicio del eje ferroviario.

La grieta se realiza en la zona más crítica del eje, el segundo cambio de sección, lo cual se demostrará más adelante, y se muestra en la siguiente ilustración:

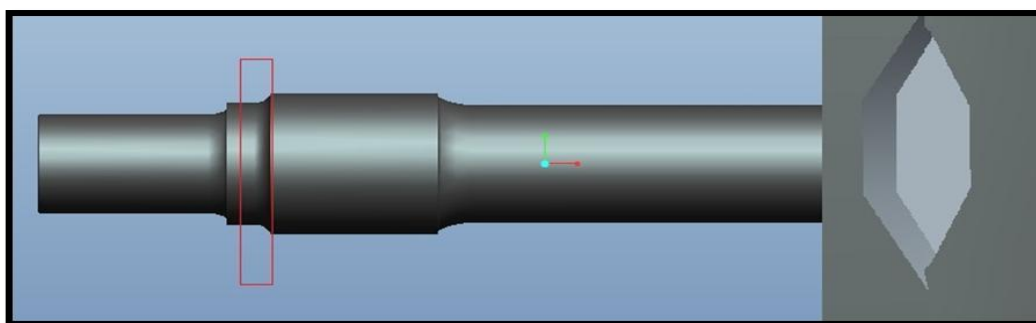




Ilustración 50. Sección donde se origina la grieta.

- Para modelar la grieta, se activa la operación de extrusión: 
- Se esboza el plano de corte: Se han ejecutado análisis con longitudes de la fisura que oscilan entre 0,5 mm hasta 6 mm, lo que ha implicado que las restantes dimensiones de la grieta se hayan visto modificadas. Sin embargo, la profundidad del vaciado se mantendrá constante con un valor de 1mm.
- Dentro de la propia operación de extrusión se ha de especificar que se quiere quitar material. Por tanto se presiona sobre el icono: 
- Se indica la profundidad de la extrusión. Para ello se ha de tener en cuenta el plano sobre el que parte la fisura, para que de este modo, a la hora de indicar la extensión de la misma, la profundidad de la grieta en el eje sea de 1mm.

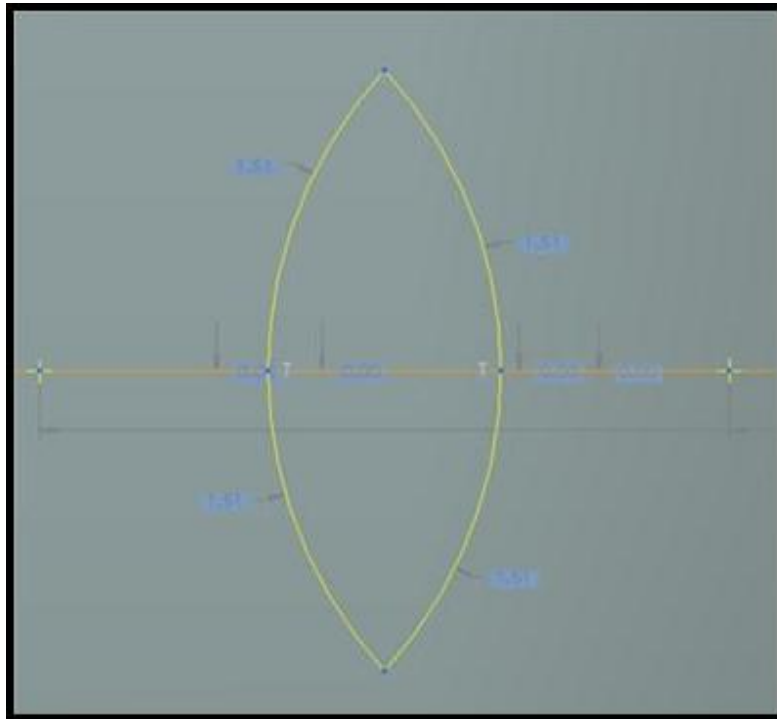


Ilustración 51. Geometría de la grieta realizada en el eje.



Ésta es la simulación que se ha seguido para la progresión de la fisura:

Tabla 3. Relación longitud / ancho de la grieta.

Longitud de grieta (mm)	Ancho de grieta (mm)	Relación longitud/ancho
0,5	0,2	2,5
1	0,4	2,5
1,5	0,5	3
2	0,6	3,33
2,5	0,6	4,16
3	0,6	5
3,5	0,6	5,83
4	0,6	6,67
4,5	0,6	7,5
5	0,6	8,33
5,5	0,7	7,5
6	0,8	7,5

La longitud final de la fisura se ha ido variando en función del estudio a realizar.

En uno de los estudios se ha prolongado hasta los 20 mm, y a partir de 6 mm de longitud se ha variado de manera automática la relación longitud/ancho, es decir, el ancho de la grieta no se ha variado manualmente, sino que ha sido el propio programa el que lo modifica de manera proporcional.



8. CONFIGURACIÓN DE LOS ANÁLISIS

8. CONFIGURACIÓN DE LOS ANÁLISIS. PREPARACIÓN DEL EJE.

8.1. DEMOSTRACIÓN DE LA SIMETRÍA DEL EJE.

A continuación se justificará la simplificación por simetría del eje, demostrando que los resultados de tensiones y deformaciones son similares en los casos de estudiar el eje completo o el eje con simetría. Para el estudio del eje se utilizará el módulo *Mecánica*.

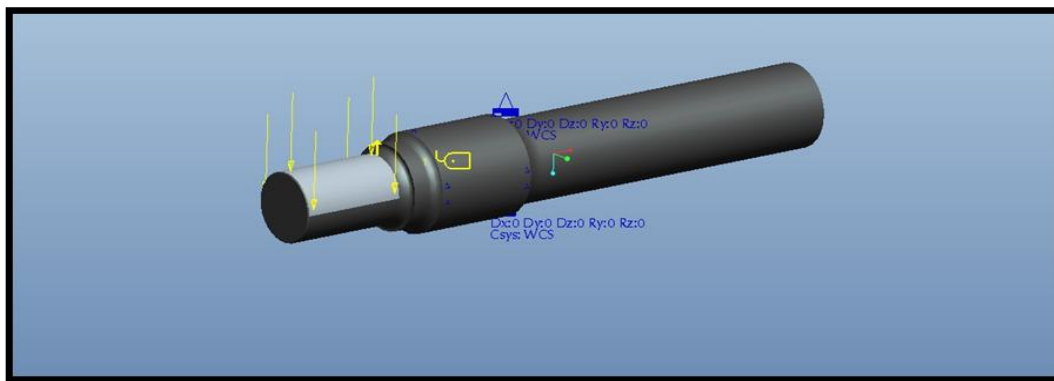


Ilustración 52. Definición y cargas de la mitad del eje.

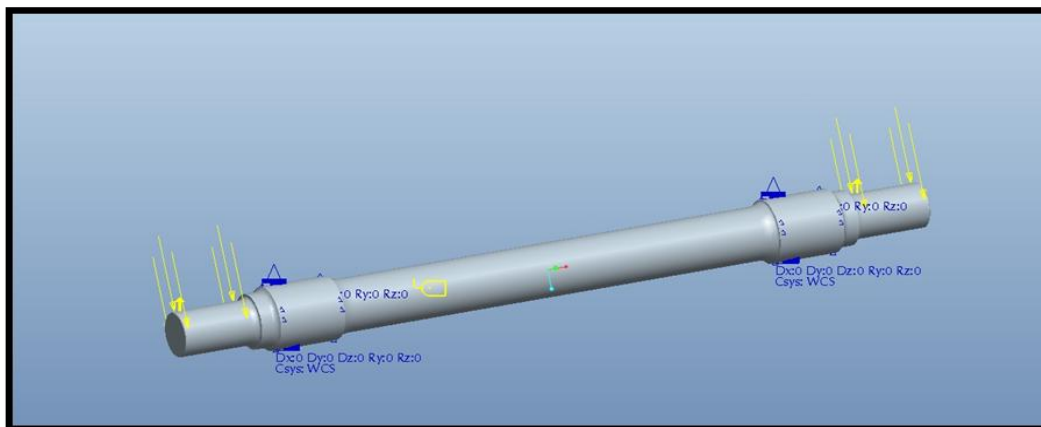


Ilustración 53. Definición y cargas del eje completo.

Comparación de las tensiones en los dos casos:

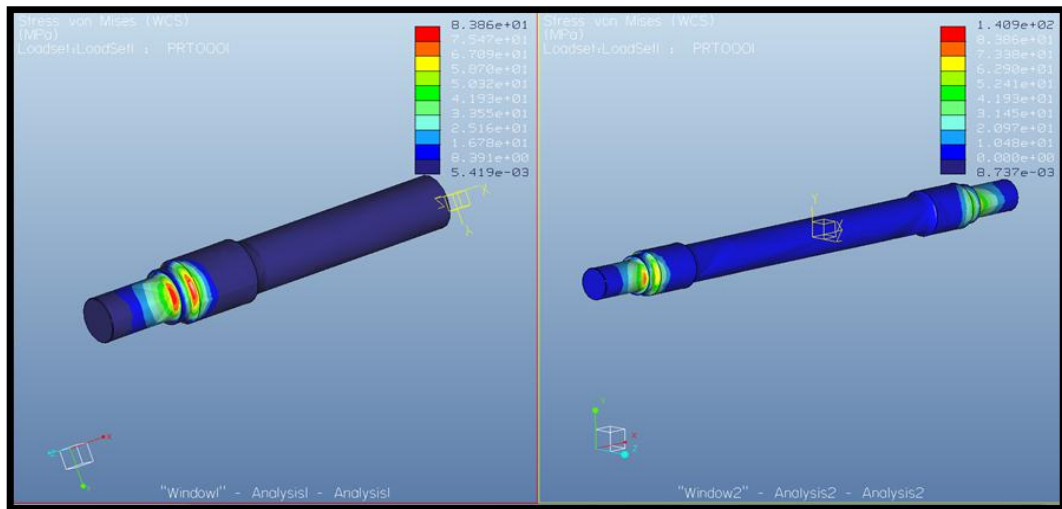


Ilustración 54. Diagrama de tensiones para los dos casos.

Tabla 4. Resultados de los valores de tensiones (MPa).

	Tensiones máximas (MPa)
Mitad del eje	83,72
Eje completo	81,984

Según se muestra en la tabla 4, los valores de las tensiones máximas son similares. En el caso del eje sin simetría la leyenda informa de un valor de 140,9 MPa, el cual se encontrará en alguna singularidad aislada, ya que no es apreciado por el programa en la zona más crítica como se puede ver en la siguiente figura.

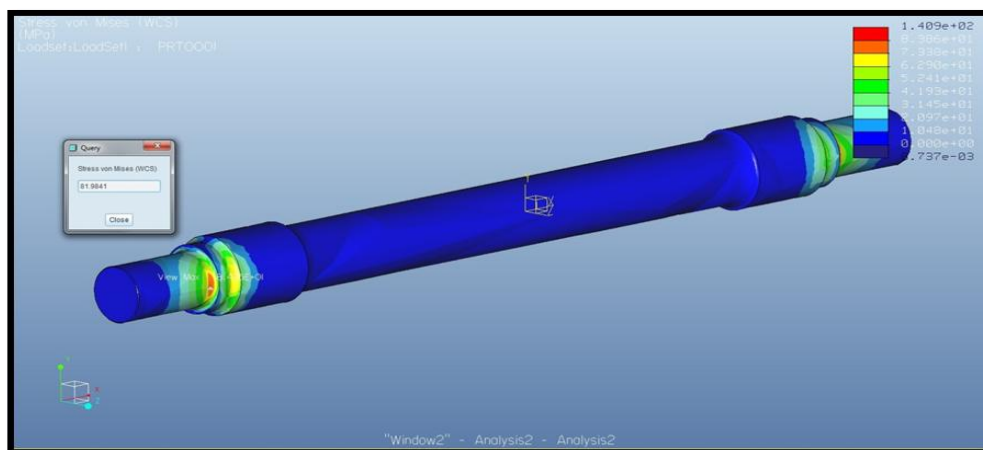


Ilustración 55. Máximo valor de tensión soportada por el eje.

Comparación de las deformaciones en los dos casos:

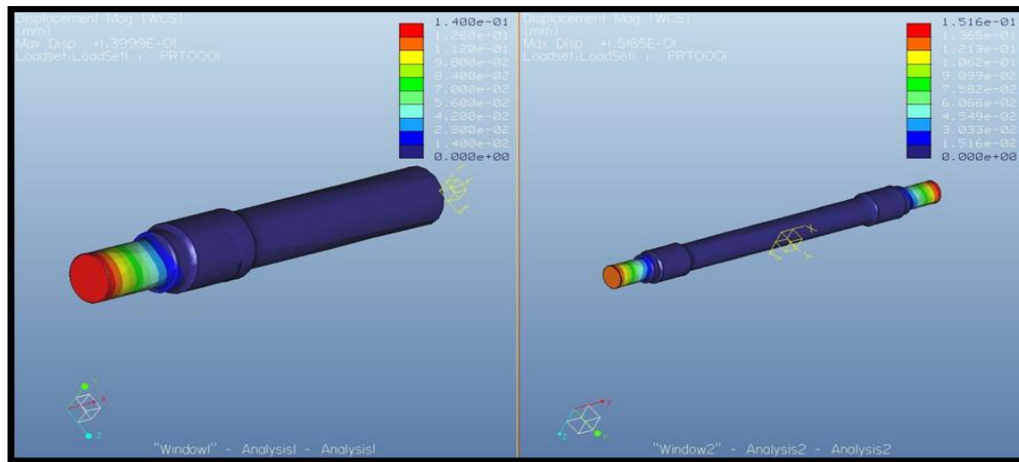


Ilustración 56. Diagrama de deformaciones en los dos casos.

Tabla 5: Desplazamientos máximos obtenidos en los dos casos.

	Desplazamientos máximos (mm)
Mitad del eje	0,14
Eje completo	0,1516

Debido a que los valores de tensión y deformación son muy similares, para reducir los tiempos y volúmenes de cálculo, y agilizando así el proceso, se estudiará la mitad del eje, o eje con simetría.

8.2.CARGAS Y RESTRICCIONES.

En cuanto al sistema de cargas empleado en los análisis, se ha realizado una adaptación del eje que ha sido tomada de un proyecto previo [4], debido a que existe un problema al calcular la vida a fatiga del mismo.

Este problema radica en la imposibilidad de calcular la vida a fatiga del eje teniendo en cuenta los contactos entre los demás elementos del sistema mecánico, como serían los cojinetes y las ruedas.

Esto se debe a que cuando se analizaba el modelo completo, se aplicaban las restricciones en una pequeña porción del área de rodadura, sin embargo, si se desea

analizar el eje individualmente resulta inviable, ya que habría que restringir en cierto grado los desplazamientos del eje en la zona de unión con la rueda.

Por tanto se ha realizado una suposición en la que; ya que las tensiones más importantes y que serán objeto de estudio son las referentes a los cambios de sección, se restringirán todos los movimientos del eje en cualquier dirección, en la zona de contacto con la rueda, exceptuando el giro respecto al eje X que permitirá la rotación del eje para realizar el estudio de fatiga.

Además, el estado de cargas que se introducirá será un estado tensional lo más similar posible al obtenido previamente para el análisis estático del conjunto completo especialmente preciso en las zonas de estudio de fatiga.

Esto se realizará mediante la introducción de cargas de tracción y compresión, así como de momentos flectores en diversas zonas para que la acción conjunta de tensiones se asemeje al caso citado anteriormente.

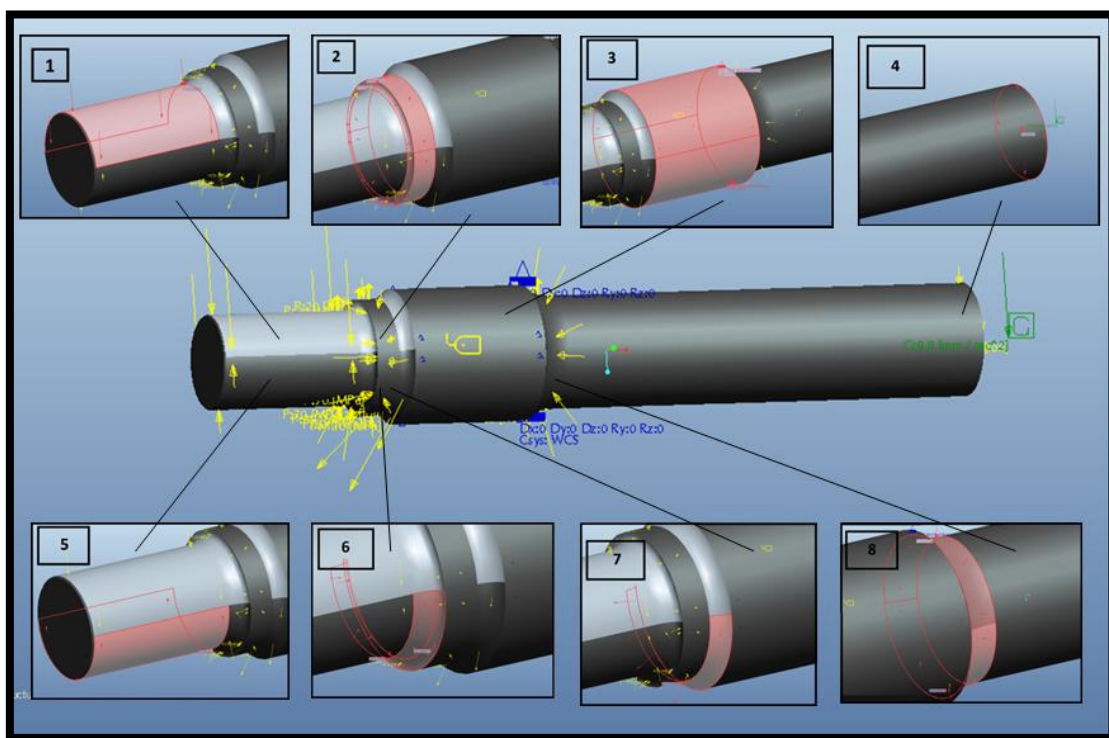


Ilustración 57. Estado de las cargas ajustado al eje a estudiar.

Carga 1: carga de la masa suspendida del vehículo ferroviario de 15 toneladas en el extremo del eje.

Carga 2: carga de compresión de 20 MPa en la segunda sección del eje.

Carga 3: restricción de la zona de acople de la rueda; donde únicamente se deja libre la rotación del eje.



Carga 4: carga vertical de 2 toneladas en el punto central del eje (plano de simetría).

Carga 5: carga de compensación de esfuerzos en la zona inferior del extremo del eje, de valor 4 toneladas en compresión.

Carga 6: carga de compensación de esfuerzos en el primer cambio de sección para incrementar el valor de las tensiones en dicha zona, de valor 70 MPa.

Carga 7: carga de compensación de esfuerzos en la mitad inferior del segundo cambio de sección de valor 110 MPa en tracción, con el fin de aliviar los elevados valores de tensión que se producen en dicha zona.

Carga 8: carga de compresión de 60 MPa en el tercer cambio de sección con el fin de simular junto con la carga 4 las tensiones en el tercer cambio de sección, ya que al estar la zona del acople de la rueda restringida, no se transmiten los esfuerzos de las demás cargas.

Peso propio: también se tiene en cuenta la acción del peso propio del eje.

Restricciones: como ya se ha comentado, se restringirán todos los movimientos en cualquier eje coordinado en la zona de contacto entre la rueda y el eje ferroviario, exceptuando el giro en el eje X para permitir la rotación de éste último.

A la hora de obtener resultados, especialmente en los análisis estáticos, hay que tener cuidado con lo que se denominan *singularidades*.

Se conocen como singularidades las zonas de tensión o flujos de temperatura teóricamente infinitos, siendo no deseables en el estudio, ya que pueden sesgar los resultados de los análisis.

En caso de existir singularidades, la solución de los análisis puede reflejar concentraciones de tensiones originadas por dichas cargas, lo que dificulta su capacidad para centrarse en los comportamientos de tensión en general, que a priori es de mayor interés.

8.3. ANÁLISIS ESTÁTICO DEL EJE FERROVIARIO.

Mostraremos a continuación los resultados que se pueden obtener mediante el programa Pro Engineer con los diferentes tipos de análisis estáticos y con el sistema de cargas establecido, para así decidir cuál de los diferentes tipos se elegirá.

- Análisis simple.

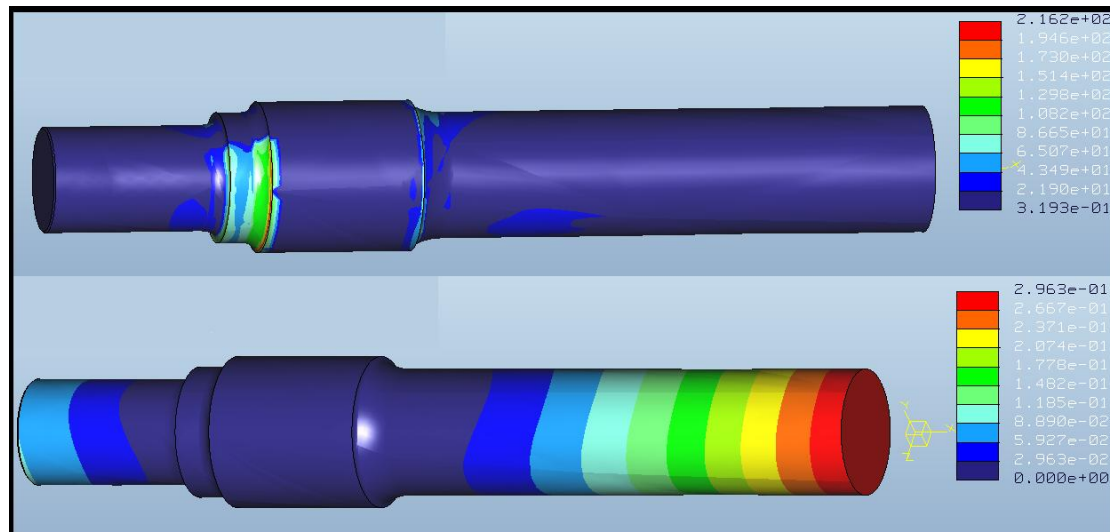


Ilustración 58. Tensiones y desplazamientos del análisis simple sin refinamiento de malla.

- Análisis múltiple de polinomio 9.

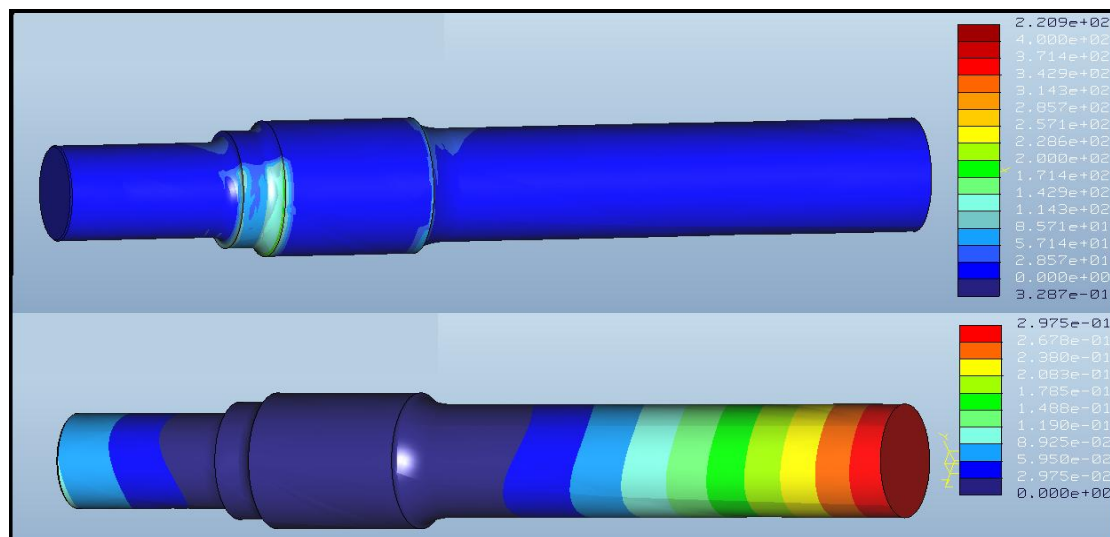


Ilustración 59. Tensiones y desplazamientos del análisis múltiple sin refinamiento de malla.

- Análisis simple con refinamiento de malla.

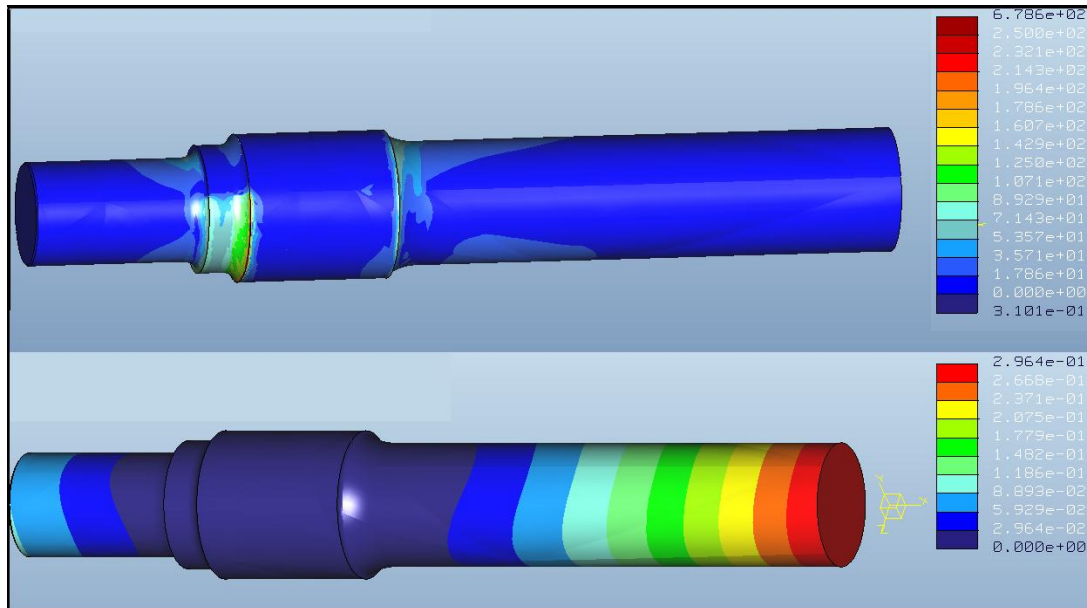


Ilustración 60. Tensiones y desplazamientos del análisis simple con refinamiento de malla.

- Análisis múltiple de polinomio 9 con refinamiento de malla.

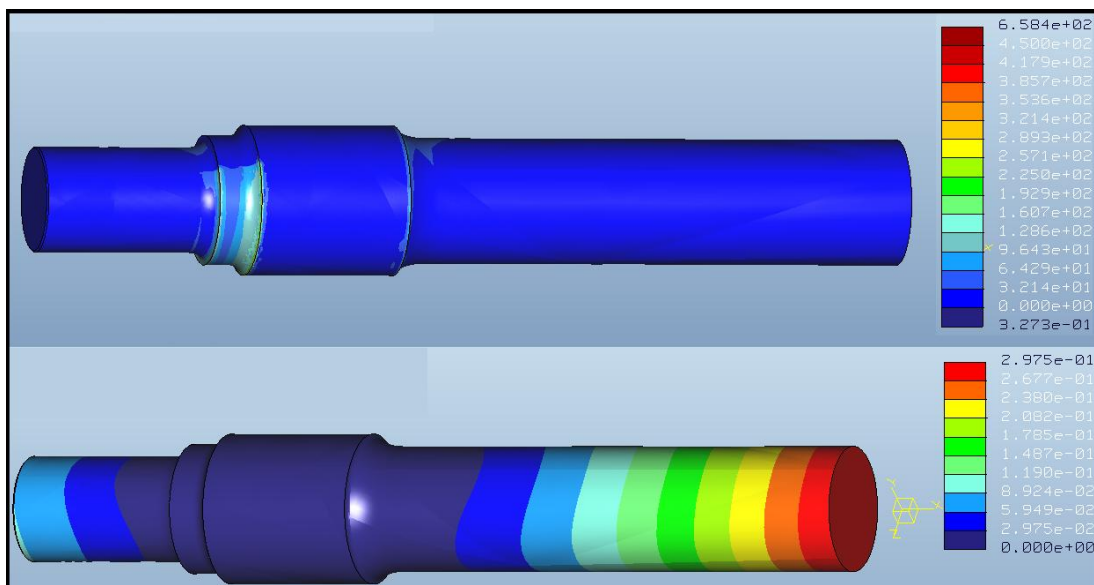


Ilustración 61. Tensiones y desplazamientos del análisis múltiple con refinamiento de malla.

Observando los resultados se puede deducir que hay una diferencia considerable en las tensiones entre los análisis con refinamiento de malla y sin refinamiento, a diferencia de los desplazamientos que son prácticamente iguales.

Además, se puede ver que en los casos con refinamiento de malla, se consigue un contorno más definido. Las secciones críticas tienen un grado de detalle muy superior a los casos sin refinamiento con la única desventaja de que se emplea un tiempo de ejecución superior. Para nuestros estudios, emplearemos el análisis simple con refinamiento de malla, ya que el resultado es casi idéntico al del análisis múltiple y su tiempo de ejecución es bastante menor.

El análisis estático será obligatorio para poder obtener el análisis de fatiga, ya que al ensayar a fluencia, el Pro Engineer demanda haber realizado previamente el correspondiente análisis estático.

Para realizar el refinado de malla en las secciones más críticas, como se ha comentado antes, se debe utilizar la opción **AutoGEM**, dentro del módulo **Mechanica**, y posteriormente habrá que hacer uso de la aplicación Control, con la cual se puede definir con más precisión la zona a refinar y el tamaño de elemento que se desea utilizar. En nuestro caso se utilizará un tamaño máximo de elemento de 15 mm.

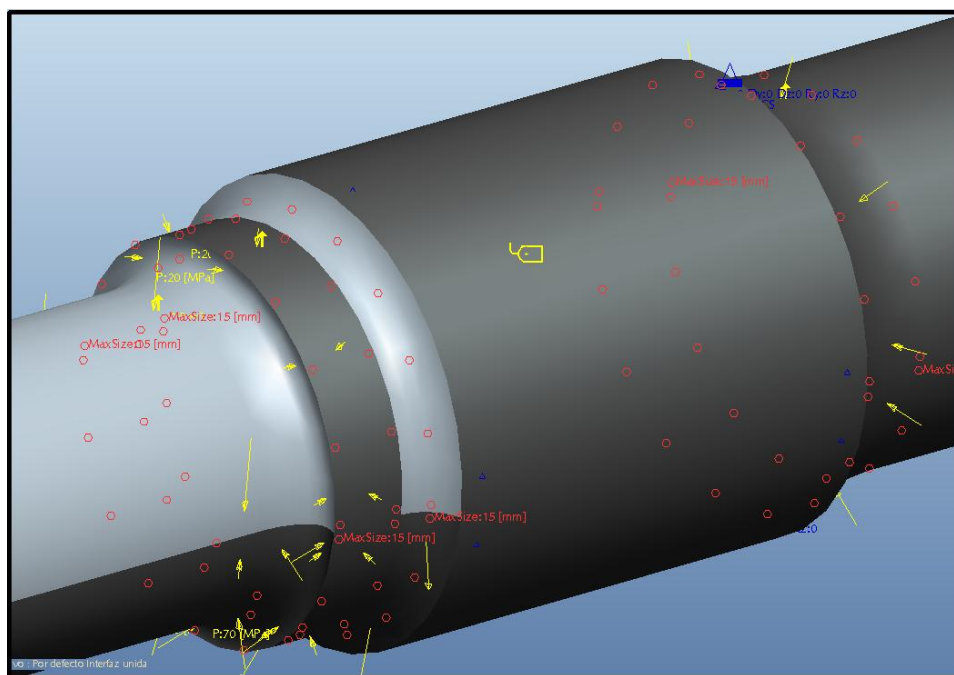


Ilustración 62. Ventana de refinado de malla.

Para concluir, se mostrarán las tensiones y los desplazamientos que sufre el eje en cuestión con las cargas que habíamos colocado sobre el mismo.

Tensiones.

En la figura ilustración 63 podemos apreciar el valor de las tensiones obtenidas tras realizar el análisis estático.

Si nos fijamos en la sección II, que es la más crítica, podemos apreciar una tensión cercana a los 150 MPa, la cual es bastante elevada comparada con las que hay en el resto del eje, y también una singularidad de valor 250 MPa, tratándose del valor máximo que alcanza la tensión.

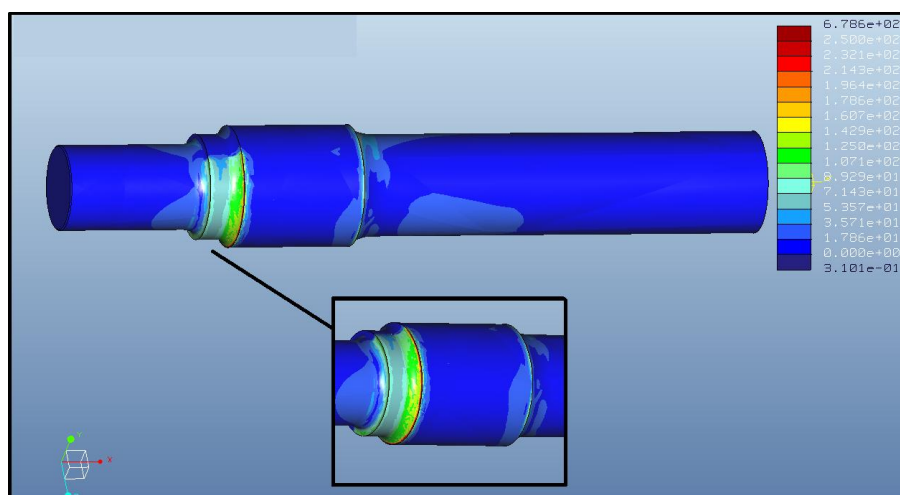


Ilustración 63. Distribución de tensiones en MPa.

Desplazamientos.

En cuanto a los desplazamientos, lógicamente los valores máximos aparecen en el extremo libre del eje, tomando valores de hasta 0.2964 mm.

También podemos observar que en la parte central del eje, la que iría acoplada a la rueda, los desplazamientos son nulos ya que se encuentra empotrada para restringir todos sus movimientos, como se explicó en el apartado de *cargas y restricciones*.

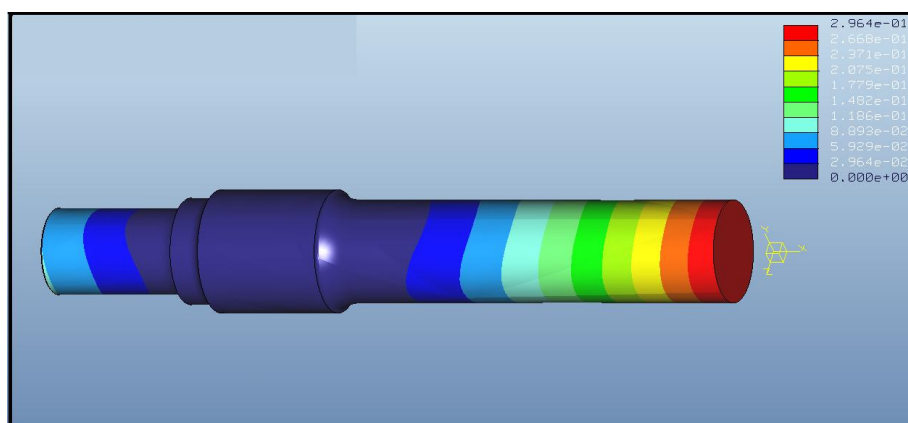


Ilustración 64. Distribución de los desplazamientos en mm.

8.4. ANÁLISIS A FATIGA DEL EJE FERROVIARIO.

A continuación se procederá a realizar el análisis a fatiga de nuestro eje en cuestión.

El primer paso será definir las secciones críticas existentes en dicho eje, y el nombre que se asignará a cada una de ellas.

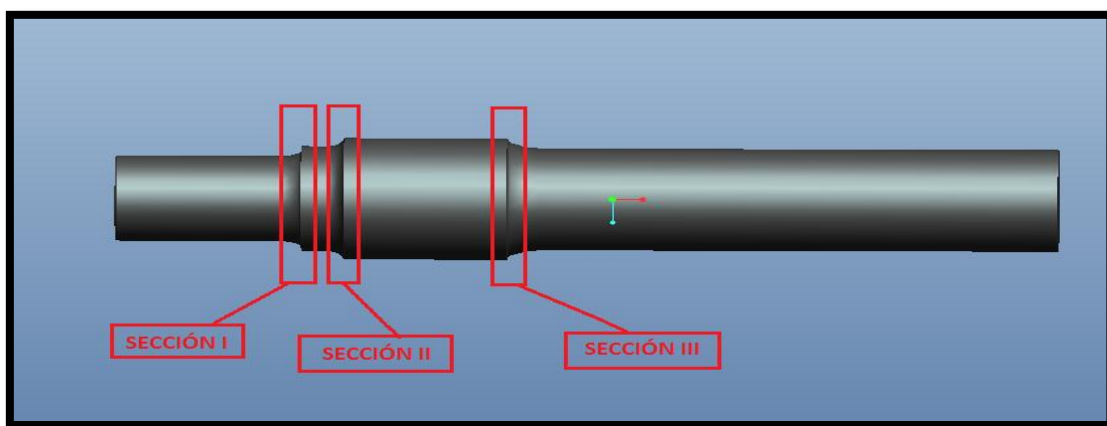


Ilustración 65. Definición de las secciones críticas del eje.

Definidas las secciones críticas a tener en cuenta, se realizará el cálculo del factor de concentración de tensiones (K_t), mediante la gráfica mostrada a continuación y extraída de la teoría de fatiga.

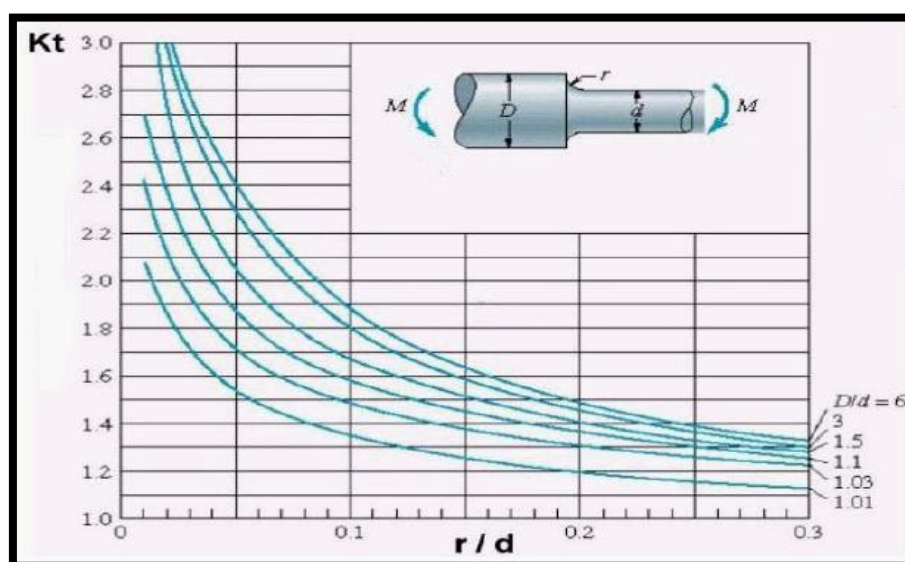


Ilustración 66. Barra de sección circular en flexión con estrechamiento y entalles.

Para la sección I:

$$\frac{r_I}{d} = \frac{8}{130} = 0,0615; \quad \frac{D}{d} = \frac{160}{130} = 1,23 \Rightarrow K_{TI} = 1,82$$

Para la sección II:

$$\frac{r_{II}}{d} = \frac{20}{160} = 0,125; \quad \frac{D}{d} = \frac{185}{160} = 1,156 \Rightarrow K_{TII} = 1,50$$

Para la sección III:

$$\frac{r_{III}}{d} = \frac{15}{155} = 0,096; \quad \frac{D}{d} = \frac{185}{155} = 1,19 \Rightarrow K_{TIII} = 1,60$$

Una vez obtenido lo anterior, se procederá a calcular el factor de sensibilidad a las ranuras (q) entrando en la gráfica de la siguiente figura con los valores de la tensión última a tracción y con los radios de las ranuras.

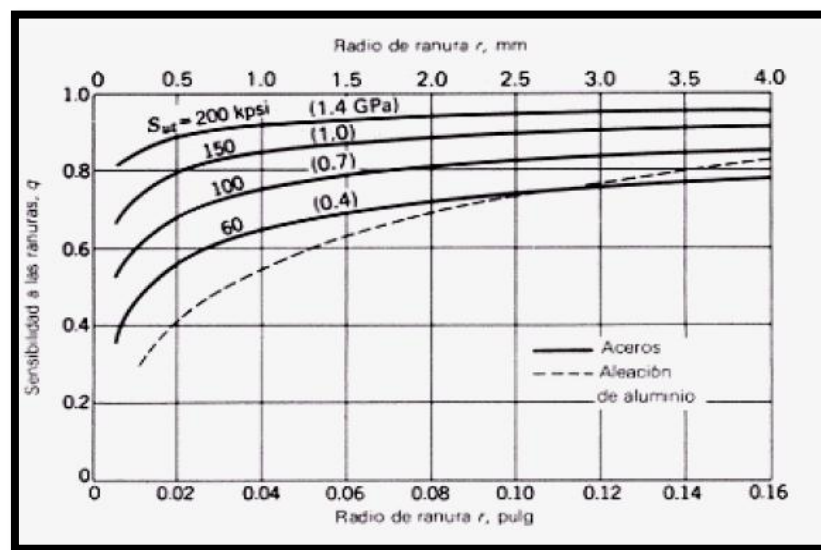


Ilustración 67. Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y axiales alternantes.

Dado que el radio de las tres secciones es mayor a 4 mm, el factor de sensibilidad a las ranuras será el mismo en todas ellas, como se puede observar en la gráfica.

$$r_I = 8mm$$

$$r_{II} = 20mm \quad \Rightarrow \quad q = 0,82$$

$$r_{III} = 15mm$$

$$S_{ut} = 656 MPa$$



A continuación se calculará el factor de la resistencia a fatiga para las tres secciones mediante la ecuación: $\mathfrak{R}_f = q \cdot (K_{Ti} - 1) + 1$

$$\mathfrak{R}_{II} = 0,82 \cdot (1,82 - 1) + 1 = 1,672$$

$$\mathfrak{R}_{III} = 0,82 \cdot (1,50 - 1) + 1 = 1,41$$

$$\mathfrak{R}_{III} = 0,82 \cdot (1,60 - 1) + 1 = 1,492$$

Finalmente, como el factor de concentración de tensiones K_e , se define como la inversa de \mathfrak{R}_f , y a su vez el factor de reducción de la resistencia a fatiga se calcula como la inversa de K_e , se obtendrá que el factor que necesitamos para el análisis a fatiga en nuestro programa sea \mathfrak{R}_f , por tanto:

$$K_{eI} = 0,598; \quad K_{eII} = 0,709; \quad K_{eIII} = 0,67$$

$$\mathfrak{R}_{II} = 1,672; \quad \mathfrak{R}_{III} = 1,41; \quad \mathfrak{R}_{III} = 1,492$$

Estos tres factores serán empleados para realizar los análisis de fatiga, cada uno para su sección crítica correspondiente. A la vista de los resultados se puede concluir que la segunda sección es la más crítica.

El factor de acabado superficial K_a , se define también en las propiedades del material, sin tener la opción de introducir directamente el valor, pero con la posibilidad de variar el tipo de acabado, por tanto variando así su valor de manera indirecta.

Existen otros factores que también se pueden cuantificar en este programa, como puede ser el factor de confiabilidad K_c , el cual viene definido por defecto como 90%.

Esto indica que el 90% de las pruebas realizadas bajo las mismas condiciones de modelo definidas, tendrán vidas superiores a la que el programa predice.

Sin embargo este factor es posible modificarlo cambiando el archivo de configuración del programa, *sim_fatigue_confidence_level* en *config.pro*.

Como se sabe de la teoría de fatiga estudiada anteriormente, hay otros factores que también afectan de manera destacable al límite de fatiga de un componente. Estos pueden ser el tratamiento superficial, la existencia de cambios de sección o muescas y el tamaño del propio componente.

En cuanto al resto de cuadros a completar para el análisis, introduciremos las siguientes características:

- Tipo de material: Acero de baja aleación.
- Acabado superficial: Granallado. Este proceso consiste en la proyección de partículas abrasivas (granalla) a gran velocidad, que, al impactar con la pieza tratada, produce la eliminación de las imperfecciones. Es un proceso muy utilizado en la industria ferroviaria. Según los manuales de *Pro Engineer*, este proceso asegura la mínima rugosidad que indica el plano de diseño.

A continuación mostraremos la pantalla de definición de material con todas las características explicadas anteriormente y el factor R_f de la sección II:

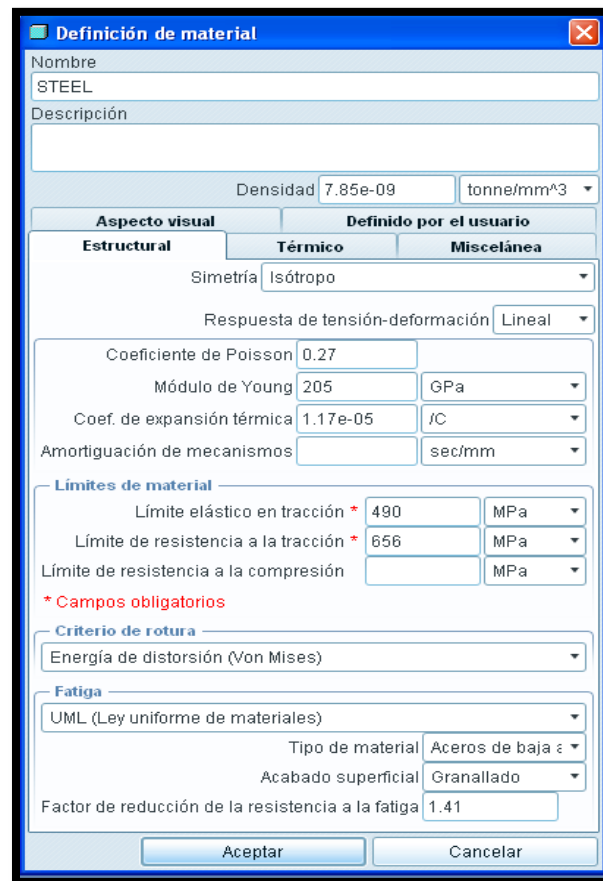


Ilustración 68. Ventana de definición de material en Pro Engineer.

Una vez realizado el análisis de esfuerzos del eje, se procede a simular el análisis a fatiga según la norma UNE-EN 13260 [12].

8.4.1. PARÁMETROS QUE VARÍAN EN FUNCIÓN DE LOS RESULTADOS DESEADOS.

- Vida deseada: Se deberá definir un valor de ciclos de vida para el análisis del eje. Según la norma UNE-EN 13260, las probetas ensayadas a fatiga deben soportar 10^7 ciclos sin que aparezcan fisuras en su superficie.
- Tipo de carga: Se simula una carga alternante pura con los valores detallados en el análisis estático. Para ello sólo es necesario indicar en el tipo de carga **Peak-Peak**, y por defecto los factores de carga mínima y carga máxima son -1 y +1 respectivamente.

8.4.2. CONFIGURACIÓN DEL ANÁLISIS PREVIO.

Dado que siempre antes de realizar un análisis de fatiga hay que realizar uno estático, nos será muy útil marcar la casilla ***Use static analysis results from previous design study***, para reducir el tiempo de simulación, ya que con esta opción, se utiliza el análisis estático que se había realizado previamente y se evita el tener que realizarlo de nuevo.

8.4.3. RESULTADOS POSIBLES TRAS EL ANÁLISIS A FATIGA.

- Vida a fatiga: El valor que se obtiene al pulsar sobre la opción de vida a fatiga hace referencia al exponente con base 10 que representa el número de ciclos que aguantaría la sección sometida a estudio. Este valor se puede ver de manera aproximada mediante la leyenda, pero si se desea obtener una mayor precisión, se utilizará la aplicación ***Dynamic Query***, la cual ofrece el valor exacto del exponente en cada punto.
- Factor de seguridad: Esta opción será calculada en caso de activar la casilla correspondiente, la cual viene desactivada por defecto.

Se trata de la relación existente entre la tensión de fluencia del material y la tensión admisible del mismo. Cobran así gran importancia los mínimos valores de este factor en las diferentes secciones críticas del eje en cuestión, y será muy útil la aplicación ***Dymanic Query*** para tener una mayor precisión.

- Confianza de vida: El programa cuenta también con la opción de representar un parámetro que relaciona la vida calculada y la vida deseada o estimada para el componente.

Debido al carácter estadístico de la fatiga, cuanto mayor es esta confianza, más ciclos de vida tendrá el eje.



Se muestra por defecto este resultado mediante una leyenda de tres colores, con valores de 1, 2 y 3 respectivamente. Valores menores que la unidad indican el fallo del componente, por el contrario valores cercanos a tres reflejan una confianza adecuada de alcanzar la vida deseada. Este valor es más intuitivo, y muestra cómo la zona del cambio de sección fallaría antes de alcanzar la vida deseada por estar en color rojo.

Dado que esta aplicación es muy poco precisa, no se va a tener en cuenta en nuestros análisis.



9. METODOLOGÍA



9. METODOLOGÍA.

En este apartado se explicará la metodología utilizada a lo largo de cada uno de los estudios realizados mediante el módulo **Mechanica**, detallando todos los pasos que se han seguido.

9.1. ESTUDIOS PREVIOS. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN.

En este apartado, el objetivo buscado ha sido comprobar y verificar de manera global el correcto funcionamiento de **Pro Engineer** para los futuros estudios, tanto para comportamiento estático como para comportamiento a fatiga, lo cual se ha llevado a cabo mediante diferentes análisis que se detallarán a continuación.

9.1.1. ESTUDIO DE PRECARGA.

Se realizará un estudio acerca de la precarga que es necesaria aplicar sobre el eje, concretamente en la parte donde iría colocada la rueda, con la finalidad de comprender el funcionamiento del programa en cuanto al comportamiento tensional.

Esta precarga corresponde con la carga que se supone que la rueda aplica sobre el eje debido al proceso de fabricación que conlleva dicha unión, en el cual ambos elementos se ensamblan bajo una determinada presión.

Para este apartado se realizarán análisis de 25, 50, 75 y 100 MPa de precarga, seguidos de un barrido desde 100 MPa hasta 350 MPa.

9.1.2. EVOLUCIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE UN EJE ANTE LA APARICIÓN Y CRECIMIENTO DE GRIETA CON NÚMERO DE CICLOS CONSTANTE.

Una vez finalizado el estudio de precarga, se comenzará a estudiar la influencia de la geometría de las grietas en la fatiga del eje en cuestión de manera introductoria.

En este estudio se buscará comprobar el correcto funcionamiento de **Pro Engineer** para asegurar la obtención de resultados coherentes en los estudios futuros. Para ello se llevarán a cabo análisis estáticos y sus posteriores análisis de vida a fatiga correspondientes, todos ellos realizados con las condiciones de contorno explicadas previamente.

El número de ciclos de carga utilizados será un valor constante, concretamente 10^8 ciclos, y la longitud de la grieta se irá incrementando en cada ensayo, simulando así un crecimiento de la misma, ya que **Pro Engineer** no dispone de ninguna aplicación específica para la propagación de grietas. La profundidad de grieta se mantendrá invariable durante todos los ensayos, siendo su valor de 1 mm.



Para todos los análisis realizados se empleará un tamaño máximo de elemento de 15 mm, valor tomado de un proyecto anterior [4], ya que no se realizará ningún estudio previo sobre mallado. Además, se compararán todos los tipos de análisis que permite realizar el programa para decidir cuál de ellos emplear.

El inicio de la grieta se establecerá en el mínimo valor que permita el programa, y se colocará en la sección más crítica de nuestro eje, en nuestro caso, la sección II, como quedó indicado anteriormente.

Se comenzará con un estudio inicial que parta desde 0 mm (sin grieta) hasta 8 mm de longitud de grieta. El intervalo de longitudes de grieta que se utilizará para los valores comprendidos entre 0.5 mm y 1.5 mm será de 0.2 mm. Para el intervalo de 1.5 mm a 4 mm se irá aumentando el tamaño de grieta en 0.5 mm y finalmente se empleará 1 mm de incremento hasta llegar a 8 mm.

A continuación, para comprender mejor la evolución de la curva obtenida, se ampliará la longitud de grieta hasta llegar a los 20 mm, con incrementos de 2 mm en el tamaño de la misma.

Se estima que se realizarán unas 100 simulaciones, pero en caso de localizar alguna zona crítica, se tratará de refinar más alrededor de ese punto, con incrementos menores, con la intención de obtener así un resultado más exacto.

9.2.EVOLUCIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE UN EJE ANTE LA APARICIÓN Y CRECIMIENTO DE UNA GRIETA CON NÚMERO DE CICLOS VARIABLE.

Una vez que se haya comprobado que el estudio anterior genera unos datos coherentes, en cuanto a fatiga se refiere, se procederá con el siguiente estudio, sobre el cual se centra el proyecto.

El objetivo de este estudio es el cálculo de la influencia de la geometría y el tamaño de las grietas en la fatiga de un eje ferroviario macizo. Sin embargo, debido a que Pro Engineer no posee una aplicación para estudiar la acumulación de fatiga, se irá aumentando el tamaño de grieta e incrementando a su vez los ciclos de carga, simulando así, que a medida que aumenta el tiempo de utilización del eje, o sus ciclos de carga, mayor será la longitud de la grieta, ya que se habrá propagado más.

Las condiciones del ensayo, tanto de contorno como de mallado serán las mismas que en el estudio anterior.

El procedimiento utilizado será el siguiente:

- En primer lugar se modelarán las grietas con sus respectivos tamaños sobre nuestro eje de partida. Se comenzará a ensayar con 0 mm de longitud de grieta y se terminará con 6 mm, con un incremento de 0.5 mm. La profundidad de grieta se mantendrá invariable durante todos los ensayos, siendo su valor de 1 mm.
- Después se realizará el análisis estático del eje para cada longitud de grieta.
- A continuación, una vez terminados los análisis estáticos, se comenzará con los análisis de fatiga, los cuales se realizarán introduciendo en **Pro Engineer** los ciclos de carga que aparecen en una curva experimental y que corresponden a cada longitud de grieta.

Con este método, se quiere comprobar la respuesta del software ante unos ciclos de carga aplicados, obtenidos de una curva experimental del mismo material, en cuanto a vida a fatiga se refiere.

La curva experimental, representa la evolución de la longitud de la grieta en función de los ciclos a los que es sometido el eje ($a - N$).

Esta curva ha sido extraída de un artículo sobre fatiga [7] y ligeramente modificada para adaptarla a nuestro estudio.

El procedimiento seguido para su obtención y modificación se explicará en el apartado de resultados correspondiente a este estudio.

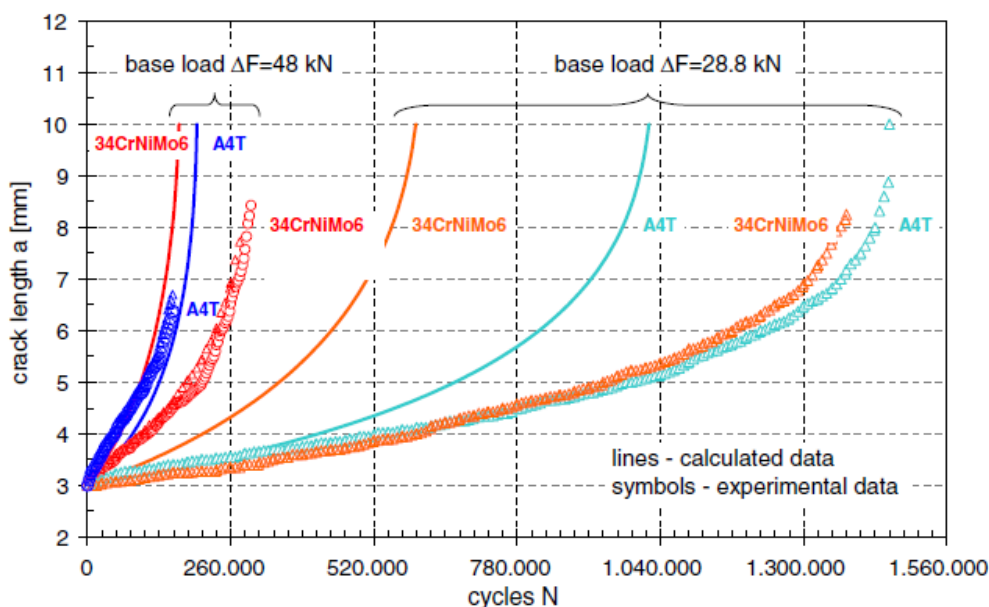


Ilustración 69. Gráfica experimental del acero extraída del artículo.



9.2.1. EVOLUCIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE UN EJE ANTE LA APARICIÓN Y CRECIMIENTO DE UNA GRIETA CON NÚMERO DE CICLOS VARIABLE (CON SINGULARIDADES).

En la etapa de documentación del proyecto, se obtuvo información sobre discontinuidades o singularidades, por lo que se realizará un estudio sobre este tema tan problemático para los programas de elementos finitos. Según la teoría, a medida que se fuera aumentando la longitud de grieta y realizando los análisis correspondientes, se podrían localizar singularidades en las partes más críticas de las grietas, las cuales se tendrán en cuenta en este estudio y que se habían obviado previamente, para así comparar los resultados con los del estudio anterior. Se mantendrán inalterados los valores de tamaño máximo de elemento y profundidad de grieta, y se continuará utilizando la curva experimental.

Se estima necesaria la realización de 50 simulaciones aproximadamente.

9.3. ESTUDIO DE MODIFICACIÓN DE FATIGA. VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE ELEMENTO MÁXIMO DE MALLA.

Como estudio adicional se tratará de realizar una modificación del estudio de fatiga con ciclos variables, que consiste únicamente en el refinamiento de la malla del eje, variando el tamaño máximo de elemento de la malla.

Este estudio busca comprobar si existe algún tipo de influencia en los resultados obtenidos realizando un refinado mayor en el mallado de los análisis precedentes, la cual fue empleada también en trabajos anteriores a éste.

En apartados anteriores se explicó que se realizará un refinamiento de malla en las secciones más críticas del eje con un tamaño máximo de elemento de 15 mm. Para este estudio, se elegirá el tamaño máximo de elemento que admita el programa a la hora de realizar los ensayos de fatiga sin presentar problemas, tratando que sea menor a 15 mm.

Una vez configurada la malla, se pasará al cálculo de los ensayos anteriores y a su comparación, para estudiar qué posible influencia puede tener el tamaño máximo de elemento de la malla respecto a los resultados obtenidos.

Para este estudio se calcula que se necesitarán unos 50 análisis tanto estáticos como de fatiga.

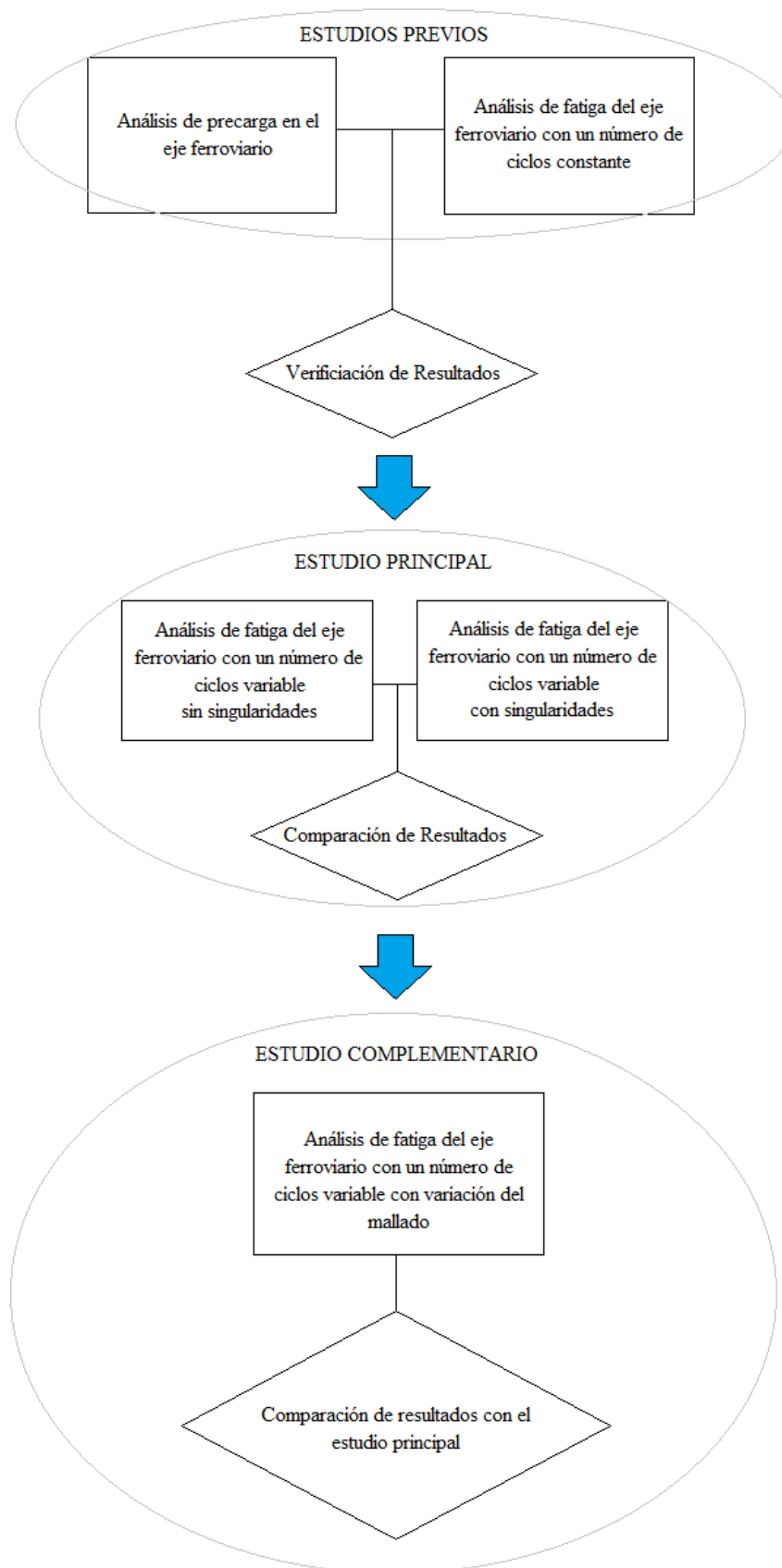


Ilustración 70. Diagrama de la metodología a seguir en la resolución del problema.



10. ANÁLISIS Y RESULTADOS



10. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

10.1. ESTUDIOS PREVIOS. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN.

En este apartado, el objetivo buscado ha sido comprobar y verificar de manera global el correcto funcionamiento de **Pro Engineer** para los futuros estudios, tanto para comportamiento estático como para comportamiento a fatiga, lo cual se ha llevado a cabo mediante diferentes análisis que se detallarán a continuación.

10.1.1. ESTUDIO DE PRECARGA.

Como primer análisis del proyecto, se realizará un estudio acerca de la precarga que es necesaria aplicar sobre el eje, concretamente en la parte donde iría colocada la rueda, con la finalidad de comprender el funcionamiento del programa en cuanto al comportamiento tensional y de los desplazamientos.

Como ya se ha explicado en apartados previos, esta precarga corresponde con la carga que se supone que la rueda aplica sobre el eje debido al proceso de fabricación que conlleva dicha unión, en el cual ambos elementos se ensamblan bajo una determinada presión.

Extraído de la norma ferroviaria, se conoce el valor máximo que puede sufrir la unión eje-rueda, cuyo valor es de 0.1 mm, sin embargo al no realizar los ensayos de precarga sobre la rueda y no ser ésta la finalidad, se habrá pasado por alto este dato, ya que se trata simplemente de un estudio de verificación, en el que no tendrá consecuencias algunas.

Para la obtención de los resultados de tensiones y en algunos desplazamientos, no se han tenido en cuenta las discontinuidades o singularidades que aparecieron en el eje, ya que se consideran insignificantes y además podrían sesgar los resultados de manera indeseable.

Las condiciones de contorno de este estudio se explican y muestran a continuación.

Dado que el objetivo es obtener únicamente la precarga en la zona del eje en la que se apoya la rueda, se ha restringido todo el eje menos dicha superficie y las secciones contiguas. Además no se ha tenido en cuenta la acción de la gravedad, de tal manera que la distribución de tensiones en la superficie del eje analizada, es uniforme.

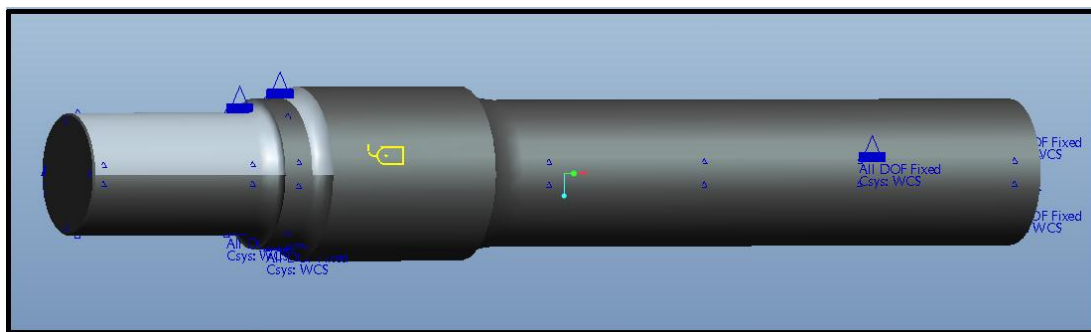


Ilustración 71. Condiciones de contorno del eje para el estudio de precarga.

Las secciones que se mantendrán sin restringir por lo explicado anteriormente son por tanto las mostradas a continuación:

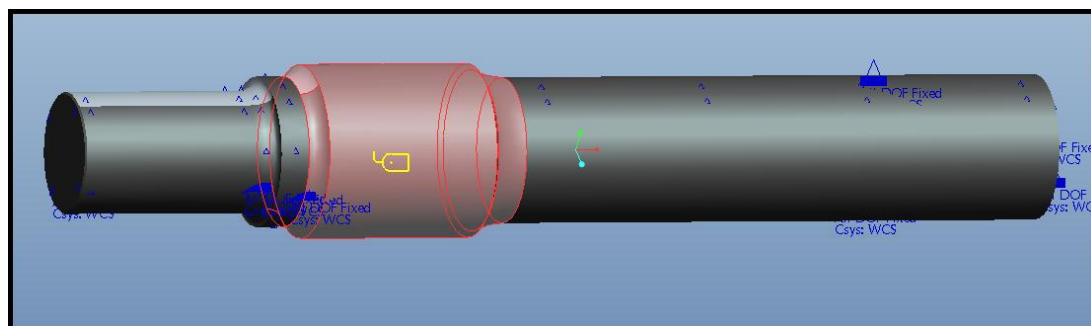


Ilustración 72. Secciones sin restringir.

El tipo de carga que se utilizará será de presión, y la posición donde se aplicará se muestra a continuación:

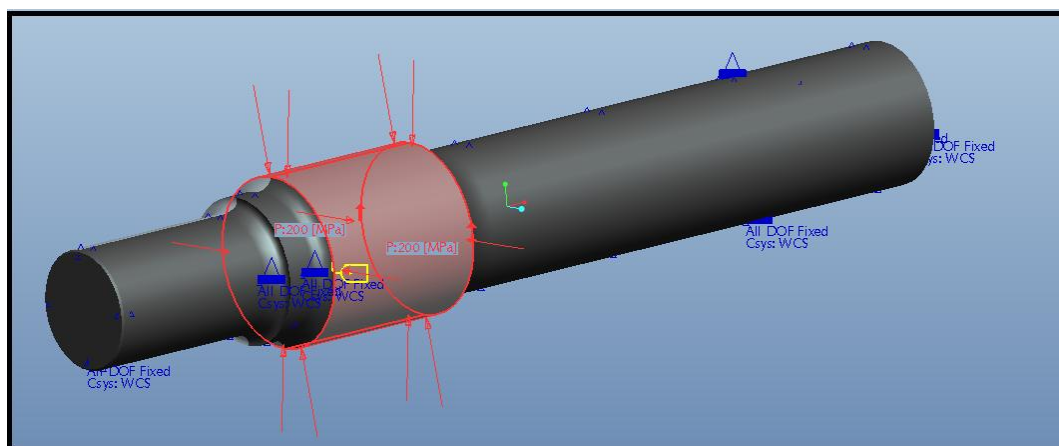


Ilustración 73. Posición y tipo de carga aplicada sobre el eje para en ensayo de precarga.

Es importante destacar que la rueda, que aparecerá en las imágenes siguientes, no ha sido modelada, sino que se ha tomado de proyectos previos [4], dado que no será objeto de estudio en este proyecto, simplemente se añadirá a modo de complemento estético.

A continuación se mostrarán algunas imágenes de los resultados obtenidos tanto de tensiones como de desplazamientos, al realizar los análisis estáticos.

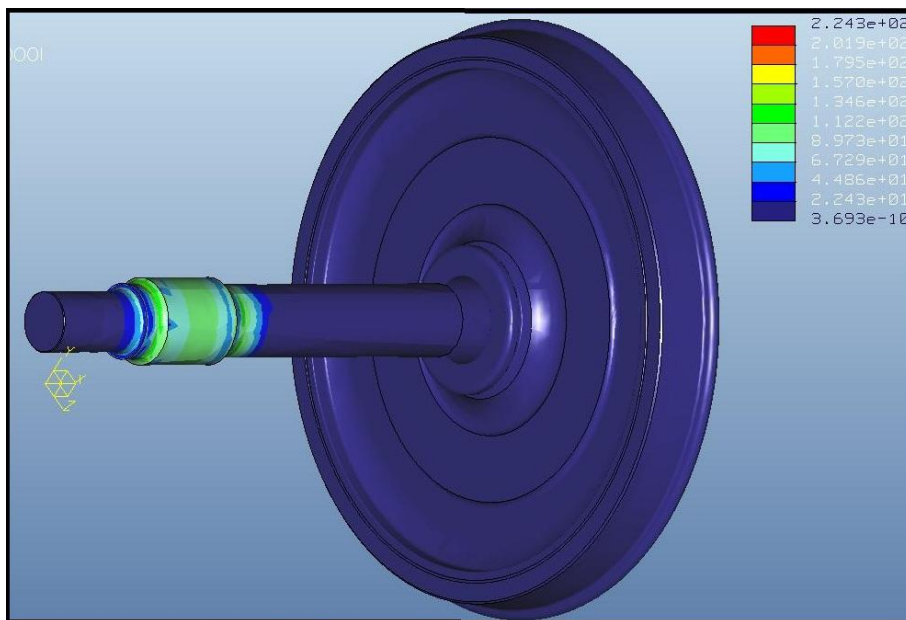


Ilustración 74. Distribución de tensiones en el eje para una precarga de 170 MPa.

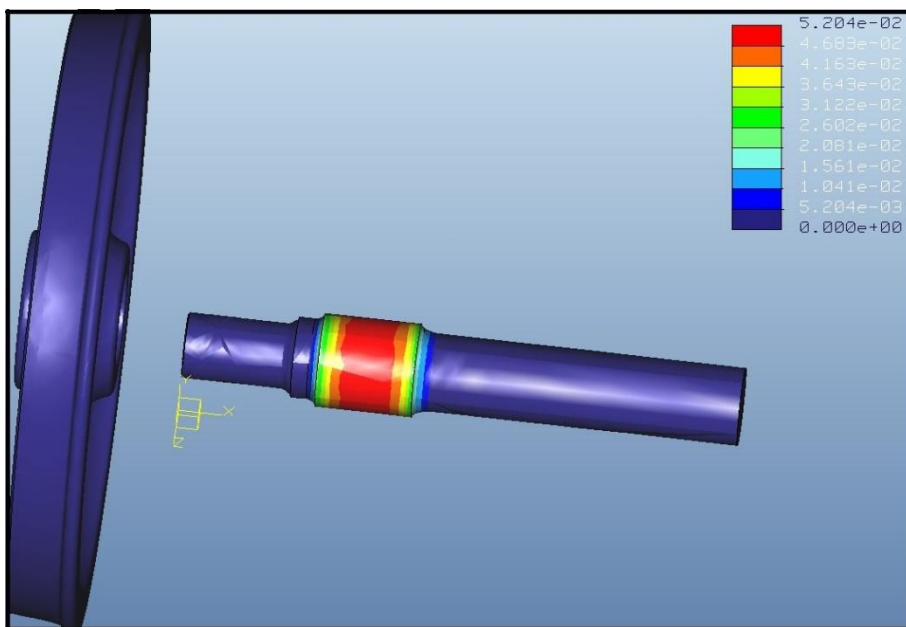


Ilustración 75. Desplazamiento máximo en el eje para una precarga de 170 MPa.

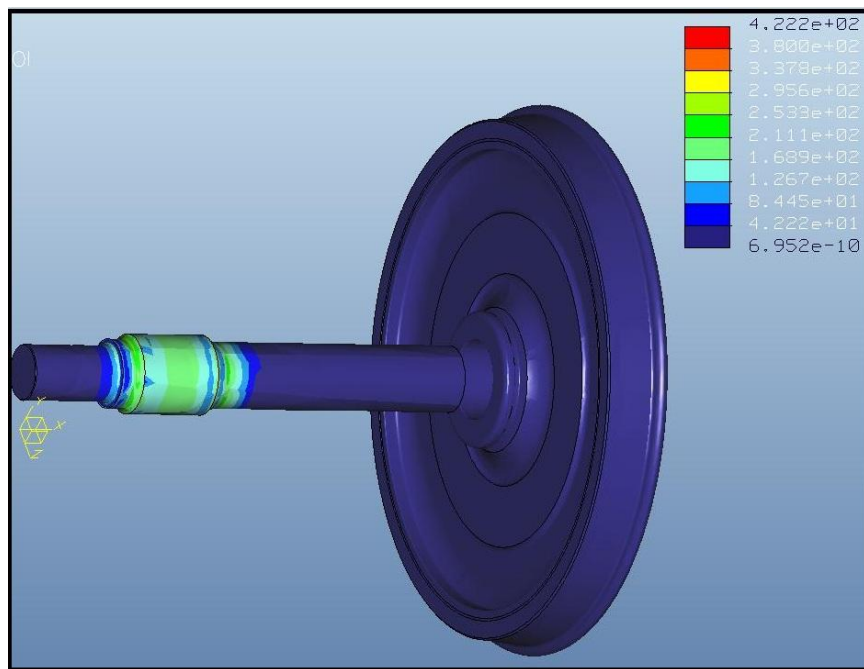


Ilustración 76. Distribución de tensiones en el eje para una precarga de 310 MPa

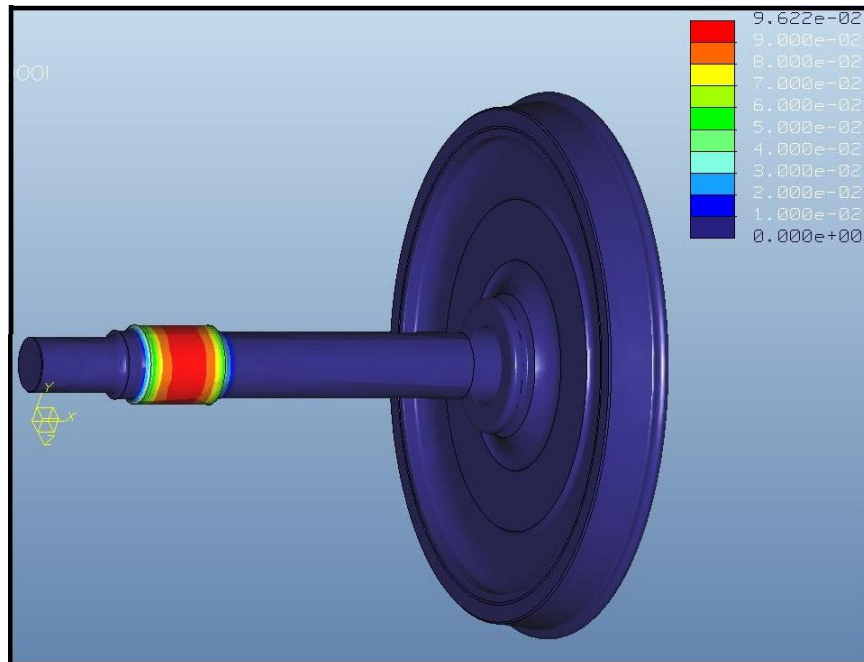


Ilustración 77. Desplazamientos en el eje para una precarga de 310 MPa.



Finalmente la totalidad de los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 6. Resultados obtenidos tras el estudio de precarga.

Precarga (Mpa)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (Mpa)
25	0,007518	19,8
50	0,01504	35,45
75	0,02255	65
100	0,03007	82,8
110	0,03308	98,3
120	0,0368	104,5
125	0,0379	116,42
130	0,03909	120,1
135	0,04059	124,7
140	0,0421	135,4
145	0,0436	138,2
150	0,0451	142,8
155	0,04661	144,6
160	0,04898	147,8
165	0,04961	154,4
170	0,05204	158,9
180	0,055	165
190	0,05805	172,5
200	0,06111	180,2
210	0,06241	186,3
220	0,06706	198,7
230	0,07011	209,8
235	0,07066	215,4
240	0,07217	220,5
245	0,07367	226,9
250	0,07517	231,5
255	0,07668	236,8
260	0,07818	240,1
270	0,08024	248,6
280	0,08321	255,8
290	0,0872	267,5
300	0,09021	275,2
310	0,09322	283,9
320	0,09622	289,7
330	0,09923	298,6
340	0,1022	307,2
350	0,1052	316,8

Ahora se podrán ver las gráficas que se obtuvieron a partir de los resultados anteriores.

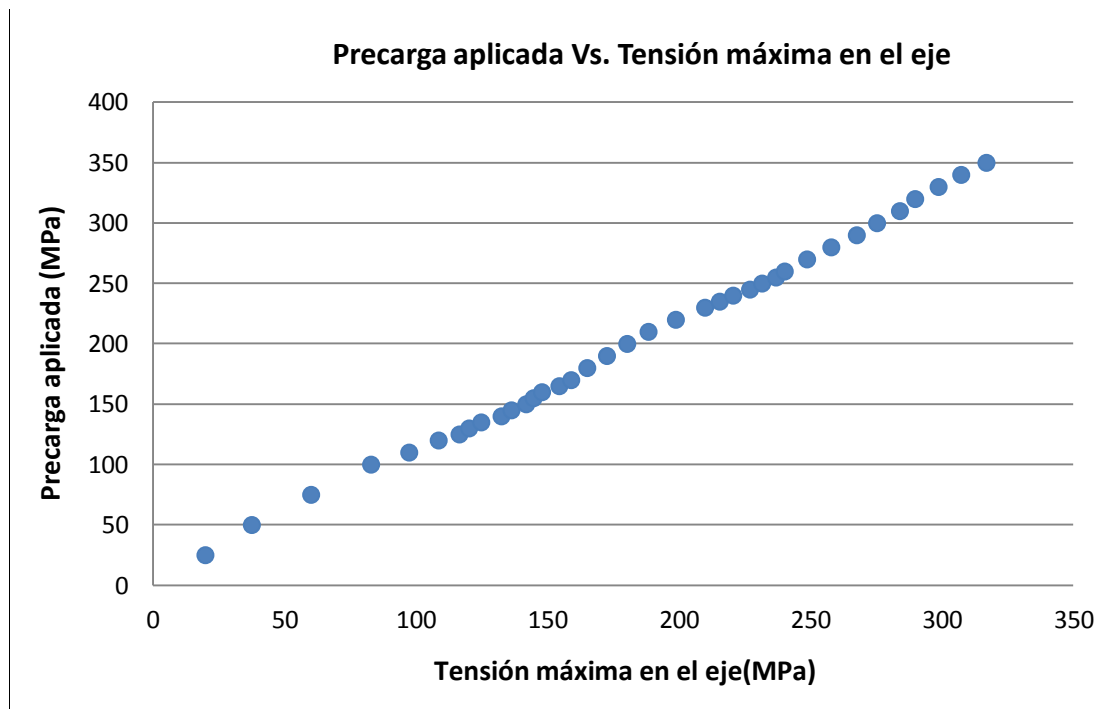


Ilustración 78. Gráfica de los valores de precarga aplicados frente a la tensión máxima que aparece.

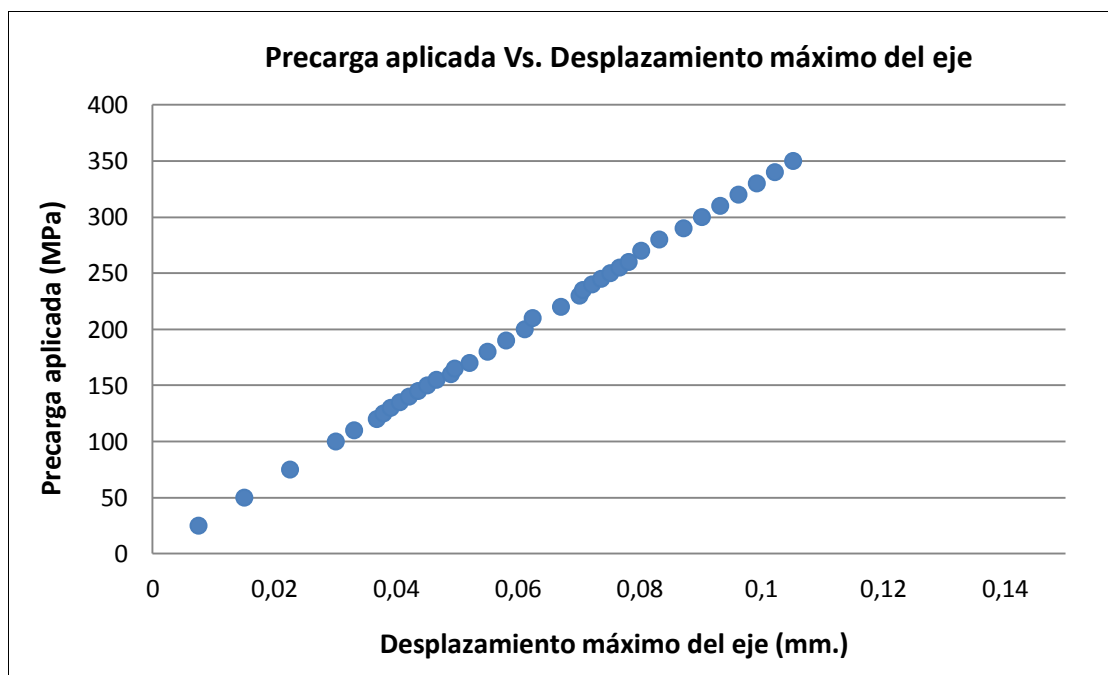


Ilustración 79. Gráfica de los valores de precarga aplicados frente a los desplazamientos máximos.



Observando las gráficas mostradas, se puede concluir que el funcionamiento del programa es aparentemente correcto tanto en tensiones como en desplazamientos.

Esto se debe a que a medida que se han ido realizando análisis de precarga y se ha ido aumentando el valor aplicado, los únicos cambios que se producen son incrementos de tensión y desplazamiento, con un comportamiento prácticamente lineal. Por tanto, una vez verificado el correcto comportamiento del módulo y la ausencia de conclusiones más interesantes, se decidió comenzar con los estudios de fatiga.

Para este apartado se han realizado análisis de 25, 50, 75 y 100 MPa de precarga, seguidos de un barrido desde 100 MPa hasta 350 MPa, con incrementos alternados de 5 y 10 MPa, llegando a un total de unas 100 simulaciones.

10.1.2. EVOLUCIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE UN EJE ANTE A LA APARICIÓN Y CRECIMIENTO DE UNA GRIETA CON NÚMERO DE CICLOS CONSTANTE.

En el presente estudio, el objetivo buscado ha sido comprobar y verificar el correcto funcionamiento del **Pro Engineer** para los futuros estudios, lo cual se ha llevado a cabo mediante análisis estáticos previos y los posteriores análisis de vida a fatiga correspondientes, todos ellos realizados con el estado de cargas explicado en apartados anteriores.

Para ello se ha utilizado un número constante de ciclos de carga, concretamente 10^8 ciclos, un valor superior al que exige la normativa, para estudiar así su posible fallo, y se ha ido incrementando la longitud de grieta en cada ensayo, simulando un crecimiento de la misma, porque como ya se ha citado, **Pro Engineer** no posee ninguna aplicación específica para la propagación de grietas.

El comienzo de la grieta se ha establecido en 0.5 mm ya que el programa no admite valores de grieta menores, y ésta se ha colocado, como ya se indicó, en la sección más crítica del eje en cuestión, en nuestro caso, la sección II.

Se comenzó con un estudio inicial que partía desde 0 mm hasta 8 mm de longitud de grieta. A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos en este análisis.

Para este estudio se han realizado unos 200 análisis, entre estáticos y de fatiga.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el primer estudio..



Ilustración 80. Ensayo a fatiga para una grieta de 1.1 mm de longitud y 10^8 ciclos de carga.

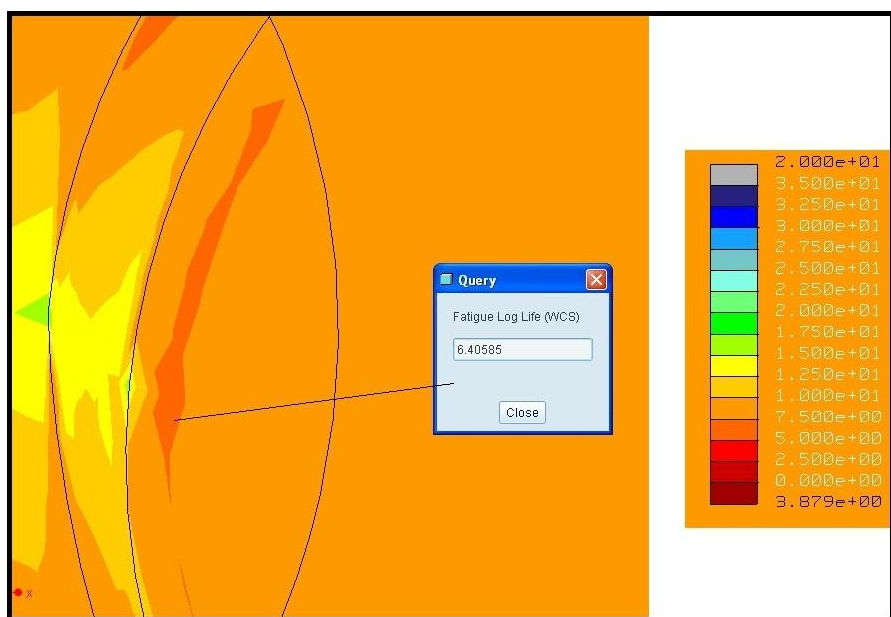


Ilustración 81. Ensayo a fatiga para una grieta de 1.5 mm de longitud y 10^8 ciclos de carga.

Lo que se puede ir apreciando en las ilustraciones 80 y 81 es que se está produciendo una disminución en la vida en servicio del eje.

Estos resultados se recogen en la tabla número 6 para posteriormente graficarlos y poder estudiar el comportamiento del eje ferroviario

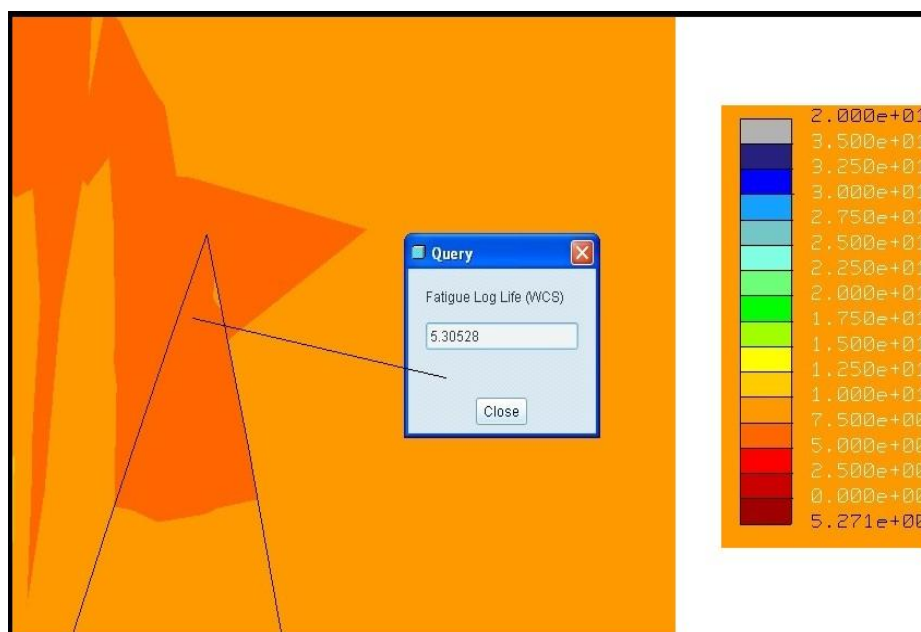


Ilustración 82. Ensayo a fatiga para una grieta de 4 mm de longitud y 10^8 ciclos de carga.

Para analizar mejor este fenómeno, se anotarán los resultados obtenidos para poder explicar gráficamente la influencia que tiene la aparición de una grieta en la vida en servicio del eje ferroviario.

La tabla número 7 recoge los resultados obtenidos tras el primer estudio.

Tabla 7. Resultados obtenidos tras el primer estudio de fatiga.

Longitud grieta (mm)	Exponente del número de ciclos (10^N)	Tanto por 1 de vida	Porcentaje de vida (%)
0	6,9438	1	100,00
0,5	6,557	0,99442956	94,43
0,7	6,53845	0,94162418	94,16
0,9	6,5141	0,93811746	93,81
1,1	6,44	0,92744607	92,74
1,3	6,425	0,92528587	92,53
1,5	6,405	0,9224056	92,24
2	6,366	0,91678908	91,68
2,5	6,21	0,89432299	89,43
3	5,853	0,84291022	84,29
3,5	5,5719	0,80242807	80,24
4	5,3052	0,7640197	76,40
5	4,9969	0,71962038	71,96
6	4,389	0,63207466	63,21
7	4,2816	0,61660762	61,66
8	4,1237	0,59386791	59,39



En la siguiente gráfica se muestra la evolución de la vida del eje ferroviario con respecto a la longitud de la grieta.

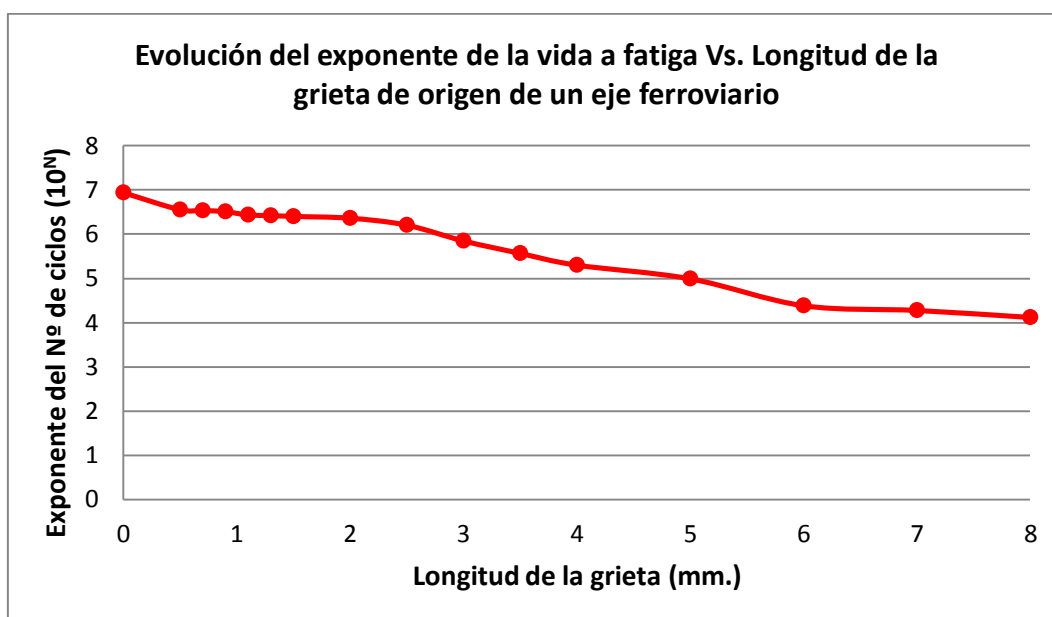


Ilustración 83. Gráfica que muestra la evolución del exponente del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de grieta (mm.).

Como se puede apreciar, el eje ferroviario experimenta una disminución de la vida a fatiga a medida que la longitud de la grieta aumenta.

La siguiente gráfica se ha elaborado con el objetivo de conocer en porcentaje la disminución de vida conforme aumenta la longitud de la grieta.

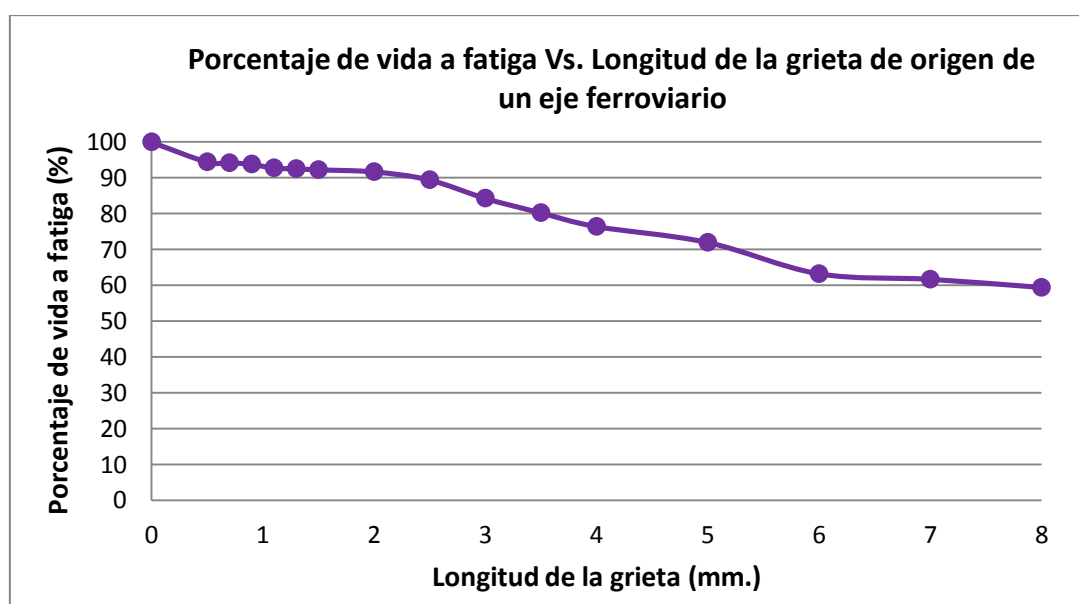


Ilustración 84. Gráfica que representa la evolución del porcentaje de vida a fatiga (%) frente a la longitud de grieta (mm.).

En la gráfica de la ilustración 84, se puede observar de qué modo decrece la vida del eje. Se aprecia que la primera caída brusca se produce en la aparición de la grieta, en la que la caída es de, aproximadamente un 6 %. Posteriormente se observa una caída más o menos constante, hasta que a partir de que la grieta supera los 2,5 mm de longitud, la caída comienza a ser más brusca.

En estos primeros resultados, se puede definir la longitud de 2,5 mm como longitud crítica a partir de la cual se producirían los daños más catastróficos en el eje ferroviario.

Cabe destacar que no se aprecia una estabilización en la vida del eje. Con lo cual el siguiente estudio que se muestra va encaminado a comprobar en qué momento se estabilizaría la vida a fatiga del eje ferroviario.

Lo que se realiza a continuación es una ampliación del estudio anterior, llegando a una longitud de la grieta de 20 mm para así verificar que la curva se estabiliza a medida que la grieta llega a un determinado valor.

Además, observando los resultados, se decidió realizar un estudio más exhaustivo y más preciso cuando la grieta tenía una longitud cercana a los 2 mm porque es en ese valor cuando parece que hay un cambio más pronunciado en la pendiente de la curva.

Por tanto se realizó un barrido desde 1.5 mm hasta los 2,5 mm de longitud de grieta con una variación de 0.2 mm para poder confirmar que la suposición anterior era cierta.

Las siguientes ilustraciones muestran algunos resultados obtenidos.

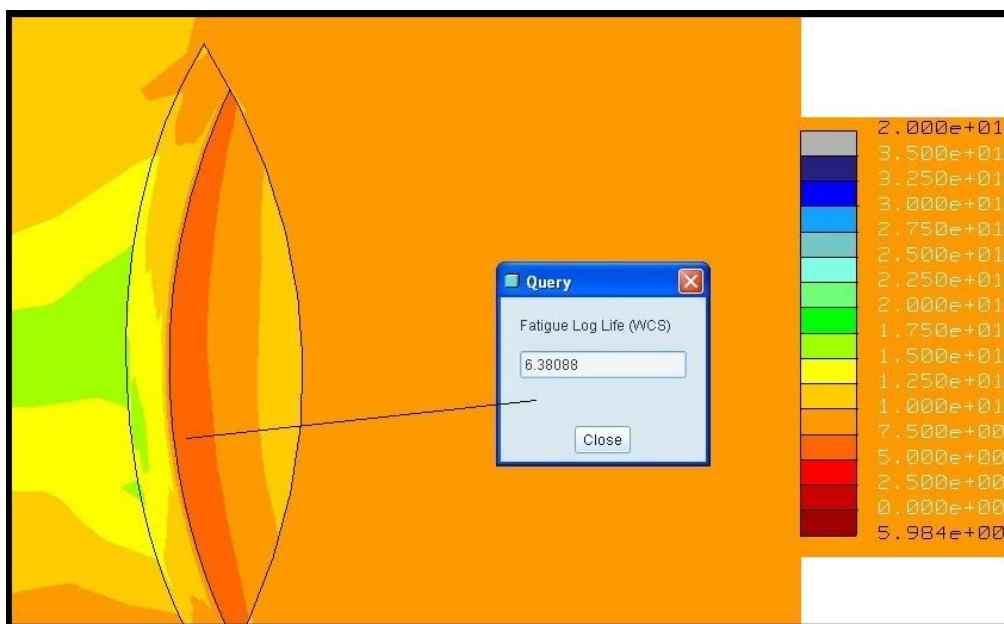


Ilustración 85. Ensayo a fatiga para una grieta de 1.9mm de longitud y 10^8 ciclos de carga.

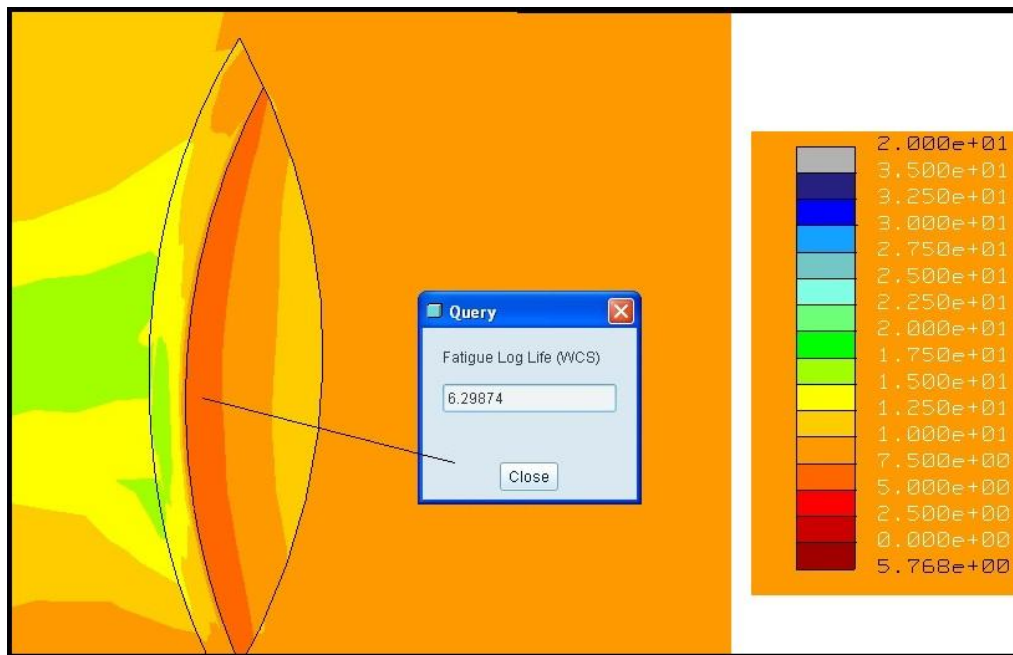


Ilustración 86. Ensayo a fatiga para una grieta de 2.3mm de longitud y 10^8 ciclos de carga.

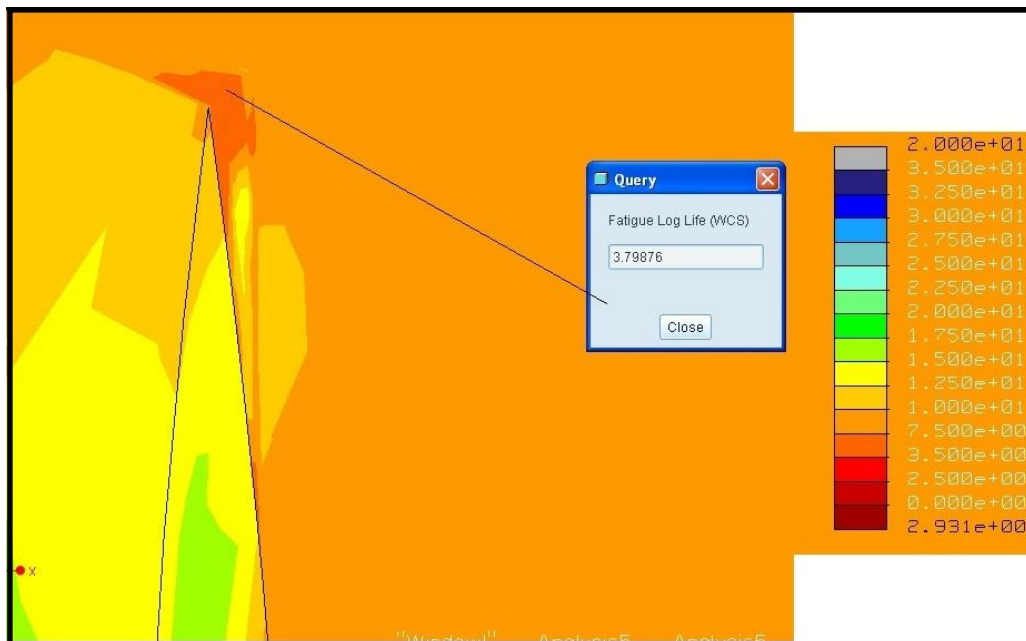


Ilustración 87. Ensayo a fatiga para una grieta de 10mm de longitud y 10^8 ciclos de carga.

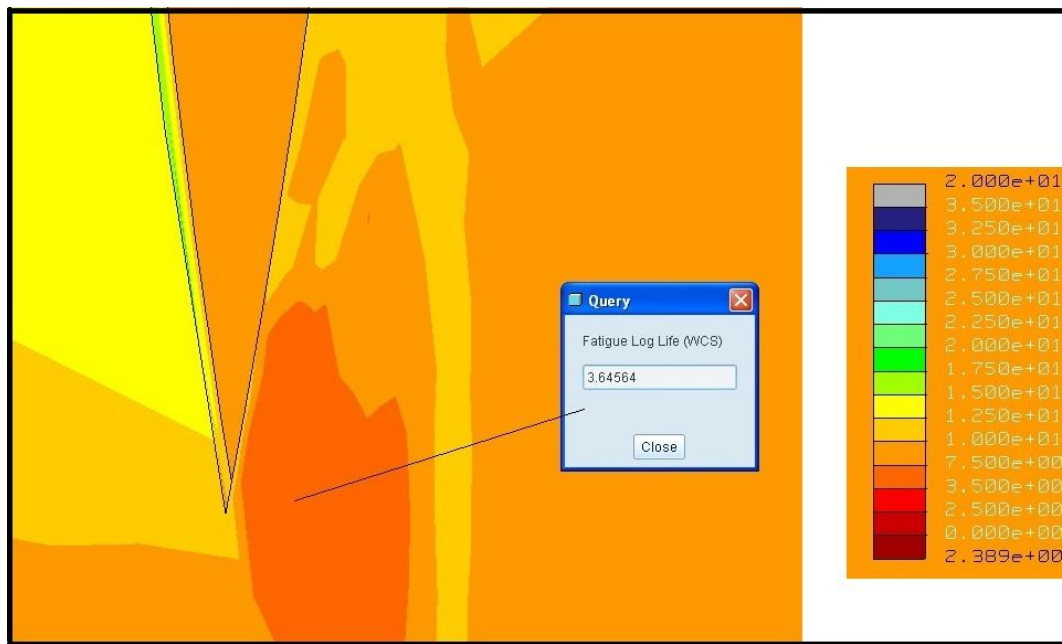


Ilustración 88. Ensayo a fatiga para una grieta de 16mm de longitud y 10^8 ciclos de carga.

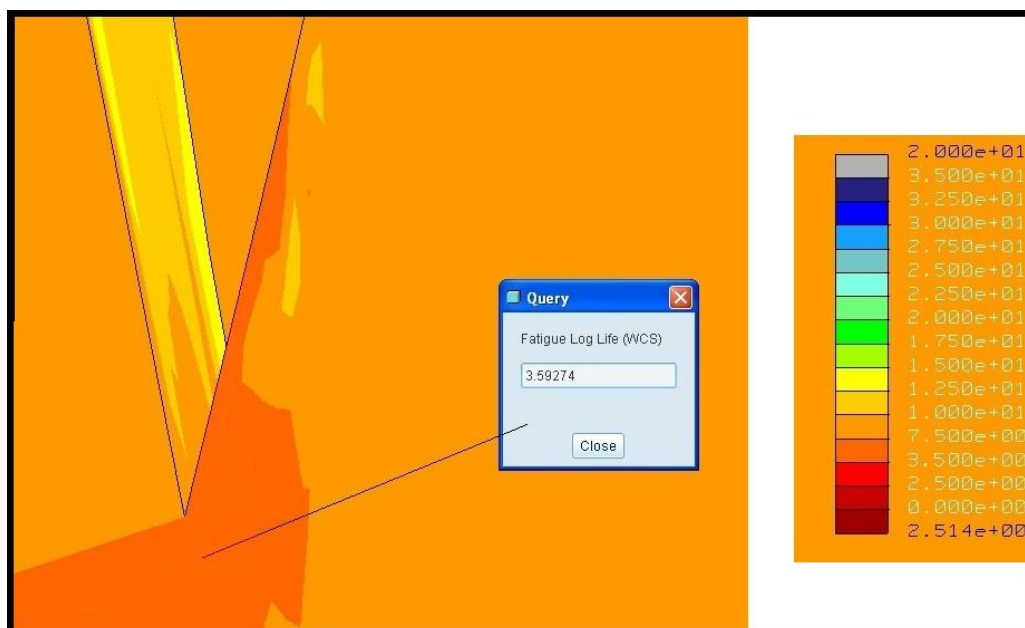


Ilustración 89. Ensayo a fatiga para una grieta de 20mm de longitud y 10^8 ciclos de carga.

Como en el estudio anterior, los resultados son recogidos en la tabla número 8 con el objetivo de estudiar el comportamiento y observar a partir de qué longitud se estabilizaría la vida a fatiga del eje ferroviario.



Tabla 8. Resultados obtenidos tras el segundo estudio.

Longitud grieta (mm)	Exponente del número de ciclos (10^N)	Tanto por 1 de vida	Porcentaje de vida (%)
0	6,9438	1	100,00
0,5	6,557	0,99442956	94,43
0,7	6,53845	0,94162418	94,16
0,9	6,5141	0,93811746	93,81
1,1	6,44	0,92744607	92,74
1,3	6,425	0,92528587	92,53
1,5	6,405	0,9224056	92,24
1,7	6,3909	0,92037501	92,04
1,9	6,3808	0,91892048	91,89
2	6,366	0,91678908	91,68
2,1	6,3496	0,91442726	91,44
2,3	6,2987	0,90709698	90,71
2,5	6,21	0,89432299	89,43
3	5,853	0,84291022	84,29
3,5	5,5719	0,80242807	80,24
4	5,3052	0,7640197	76,40
5	4,9969	0,71962038	71,96
6	4,389	0,63207466	63,21
7	4,2816	0,61660762	61,66
8	4,1237	0,59386791	59,39
9	3,9813	0,57336041	57,34
10	3,7987	0,54706357	54,71
12	3,671	0,52867306	52,87
14	3,6514	0,5258504	52,59
16	3,6456	0,52501512	52,50
18	3,6173	0,52093954	52,09
20	3,5927	0,51739681	51,74

Las gráficas que se representan a continuación son similares a las del estudio anterior, pero se elaboran con el objetivo de observar a qué longitud se estabiliza la vida a fatiga del elemento mecánico y el comportamiento que tiene el eje alrededor de la longitud crítica de 2,5 mm.

La primera gráfica muestra el comportamiento en la disminución de vida a fatiga hasta los 10 mm de longitud de grieta y la segunda hasta los 20 mm, incluyendo un análisis más detallado en la longitud crítica de 2,5 mm.

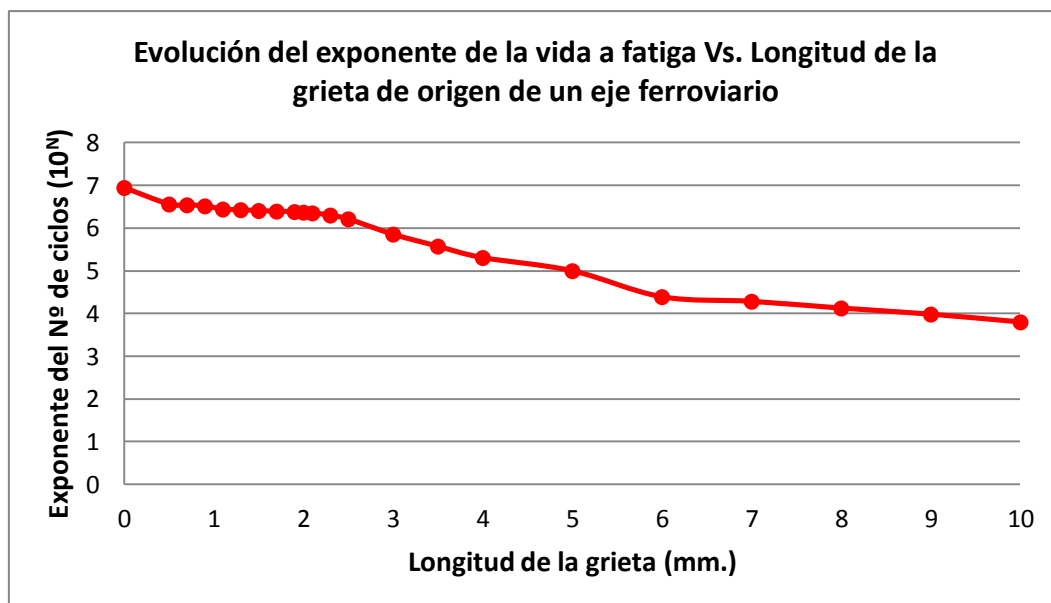


Ilustración 90. Gráfica que muestra la evolución del exponente del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de grieta (mm).

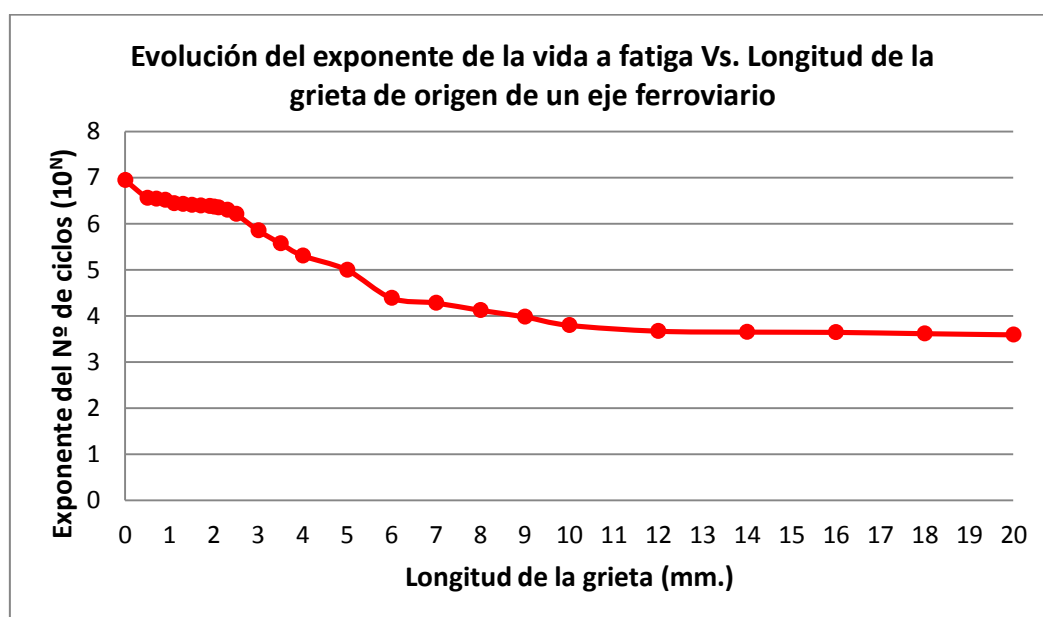


Ilustración 91. Gráfica que muestra la evolución del exponente del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de grieta (mm).

Observando las ilustraciones 90 y 91, se puede concluir, según este estudio, que la longitud crítica de grieta que se produce en un eje ferroviario y que puede acarrear consecuencias catastróficas es de 2,5 mm, porque es partir de este valor cuando la pendiente experimenta una variación más brusca.

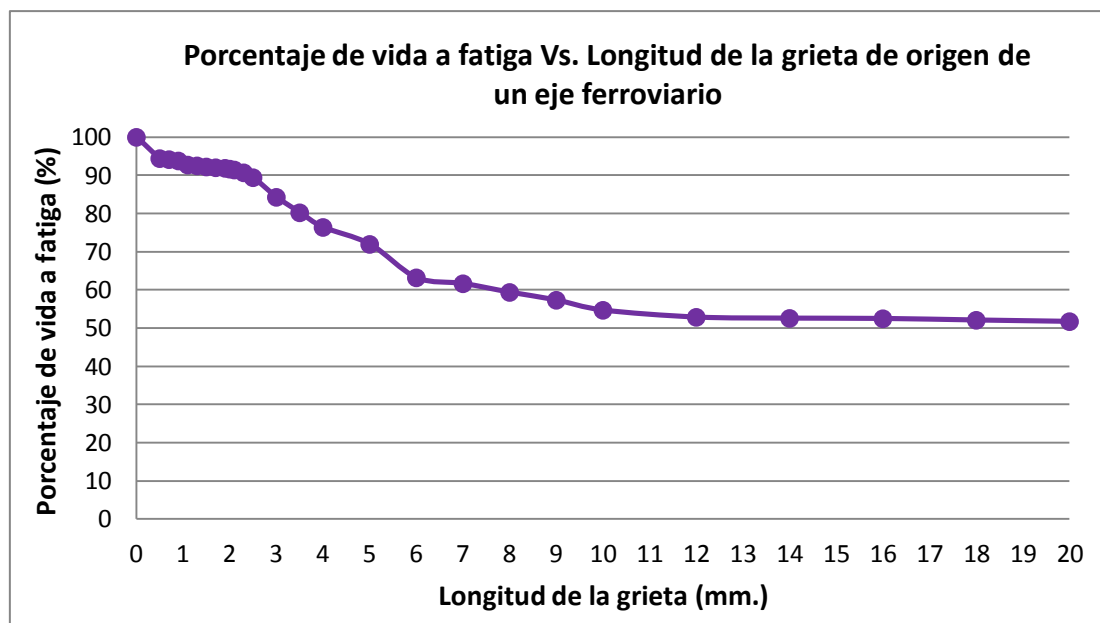


Ilustración 92. Gráfica que representa la evolución del porcentaje de vida a fatiga (%) frente a la longitud de grieta (mm.).

La última conclusión que se puede obtener de este estudio es que, cuando la grieta supera los 10 mm de longitud la curva se estabiliza. No obstante, en estas condiciones el eje resultaría inservible para su funcionamiento.

10.2. EVOLUCIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE UN EJE ANTE LA APARICIÓN Y CRECIMIENTO DE UNA GRIETA CON NÚMERO DE CICLOS VARIABLE.

El objetivo de este estudio es el análisis de la acumulación de fatiga y de la reducción de vida en un eje ferroviario con grieta a medida que aumenta el tiempo de uso, o lo que es lo mismo, los ciclos de carga. Sin embargo, debido a que **Pro Engineer** no posee una aplicación para estudiar dicho fenómeno, se irá aumentando el tamaño de grieta e incrementando a su vez los ciclos de carga, simulando así, que a medida que aumenta el tiempo de utilización del eje, o sus ciclos de carga, mayor será la longitud de la grieta, ya que se habrá propagado más.

El procedimiento utilizado es el mismo que se ha explicado en la metodología:

- En primer lugar se han modelado las grietas con sus respectivos tamaños sobre nuestro eje de partida. Se ha comenzado a ensayar con 0 mm de longitud de grieta y se ha terminado con 6 mm, con un incremento de 0.5 mm respecto al anterior.
- Después se ha realizado el análisis estático del eje para cada longitud de grieta.
- A continuación, una vez terminados los análisis estáticos, se comenzará con los análisis de fatiga, los cuales se realizarán introduciendo en **Pro Engineer** los ciclos de carga que aparecen en la gráfica y que corresponden a cada longitud de grieta.
- Curva experimental del acero de trabajo.

La curva experimental que a continuación se presenta representa la evolución de la longitud de la grieta en función de los ciclos a los que se somete el eje ($a - N$).

Tabla 9. Tabla con los datos para obtener la curva experimental del acero 25CrMo4.

Longitud de grieta (mm)	Ciclos sometidos sobre el eje
0	0
0,5	234.000
1	520.000
1,5	780.000
2	988.000
2,5	1.144.000
3	1.248.000
3,5	1.300.000
4	1.352.000
4,5	1.414.000
5	1.430.000
5,5	1.456.000
6	1.458.000

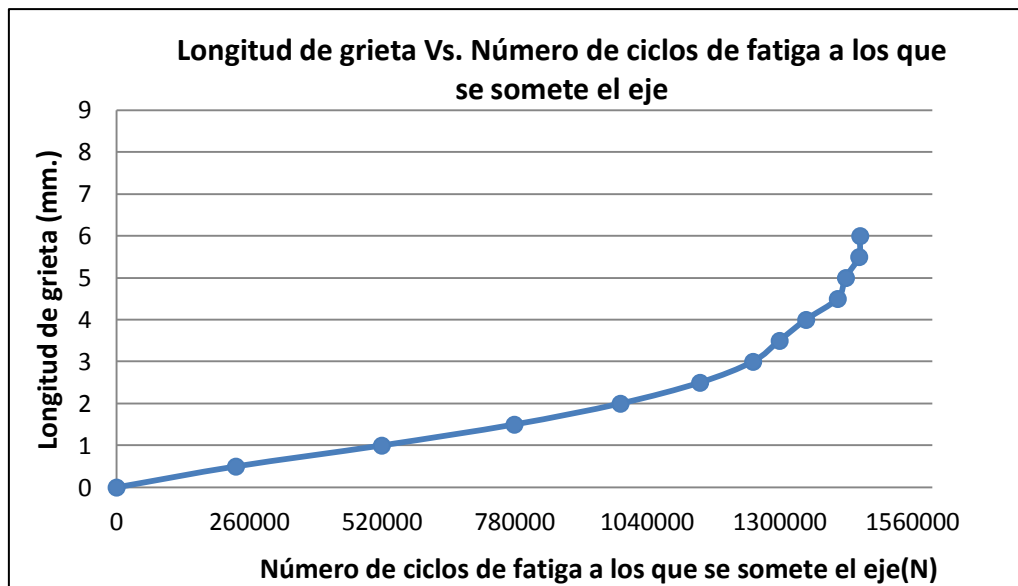


Ilustración 93. Gráfica experimental del acero utilizado en el estudio.

En un principio se intentó trabajar con el acero A1N, pero debido a la dificultad que suponía encontrar información de las curvas de este acero, se decidió buscar otro de características similares utilizado en el sector ferroviario. Finalmente se optó por el acero 25CrMo4 o EA4T, como ya se ha comentado.

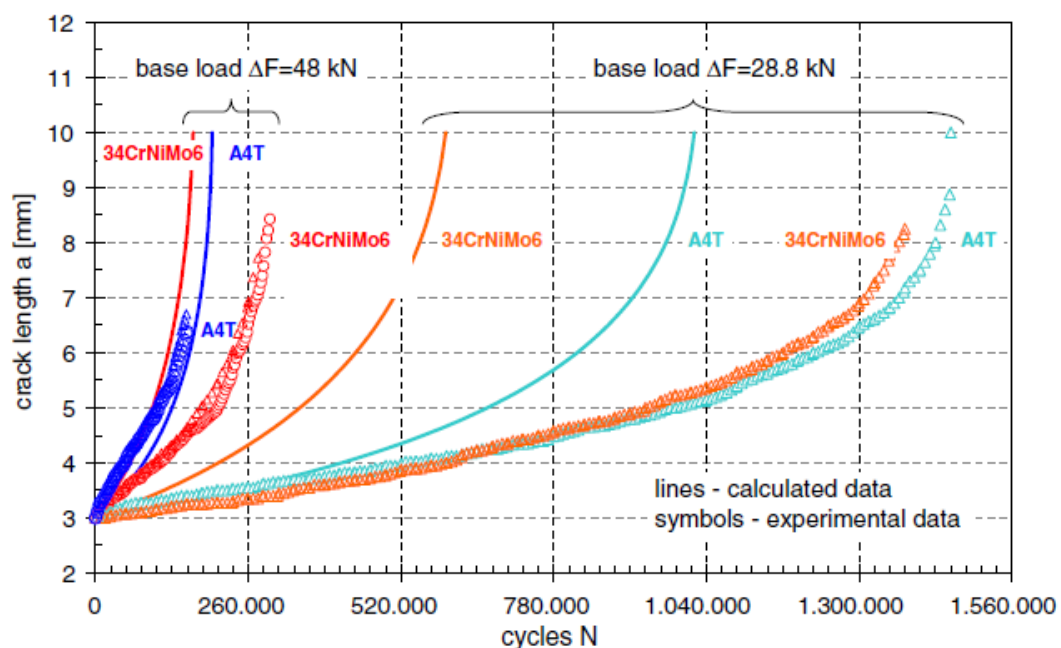


Ilustración 94. Gráfica experimental del acero extraída del artículo.

Esta curva (línea “experimental data” de color azul celeste de la ilustración 94), que ha sido ligeramente modificada para adaptarla a nuestro ensayo, se obtuvo de un artículo de fatiga [7]. En ella se ha variado el valor de inicialización de grieta de 3 mm por 0 mm, y se ha reducido el tamaño máximo, llegando hasta los 6 mm. Con estas medidas se podrán realizar análisis con longitudes de grieta menores, ya que en la etapa de documentación se obtuvo información de que en los ejes en servicio real la vida a fatiga sufre una reducción importante alrededor de los 2 mm de longitud de grieta, lo cual se comprobará.

Mediante esta curva se obtendrán a su vez otras curvas a-N, con una importante diferencia, ya que estas nuevas gráficas a-N representarán la longitud de grieta frente al número de ciclos que soportará el eje, no el número de ciclos a los que se somete al eje. Este concepto es clave para la comprensión de todo el proyecto, ya que *Pro Engineer* hace distinción entre ciclos sometidos y ciclos soportados.

A continuación se muestran algunas imágenes de los resultados obtenidos.

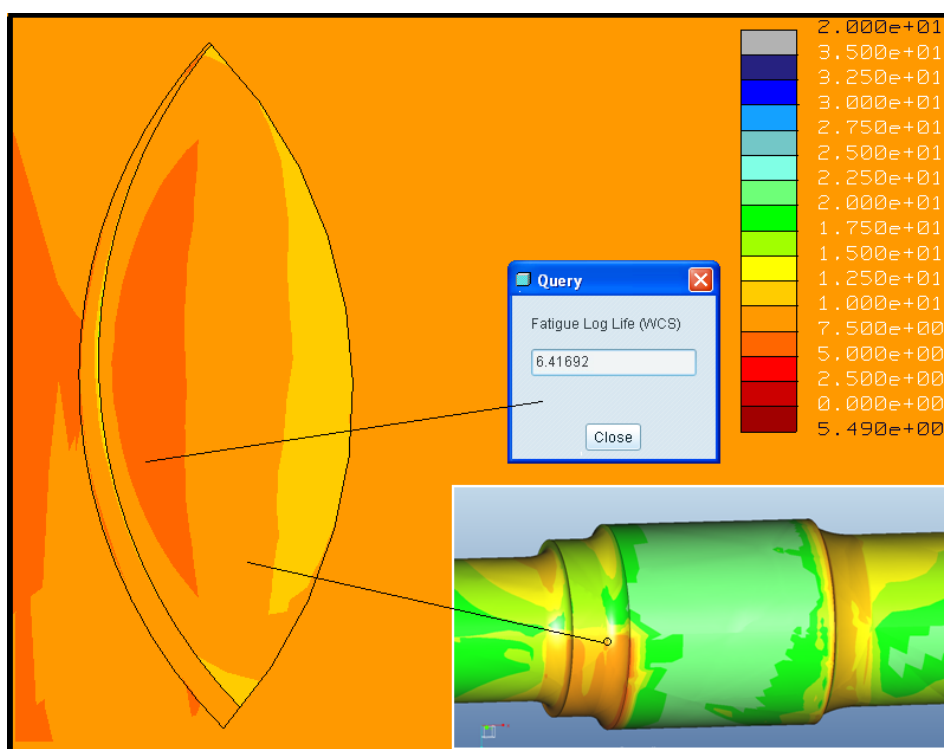


Ilustración 95. Ensayo a fatiga para una grieta de 0.5 mm de longitud y $2,34 \cdot 10^5$ ciclos de carga.

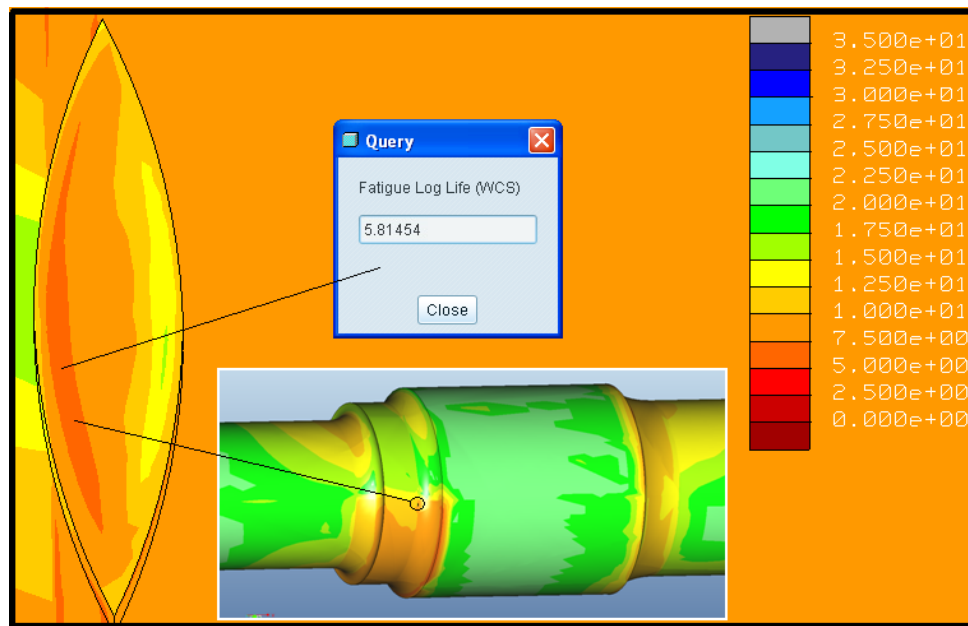


Ilustración 96. Ensayo a fatiga para una grieta de 2.5 mm de longitud y $1,144 \cdot 10^6$ ciclos de carga.

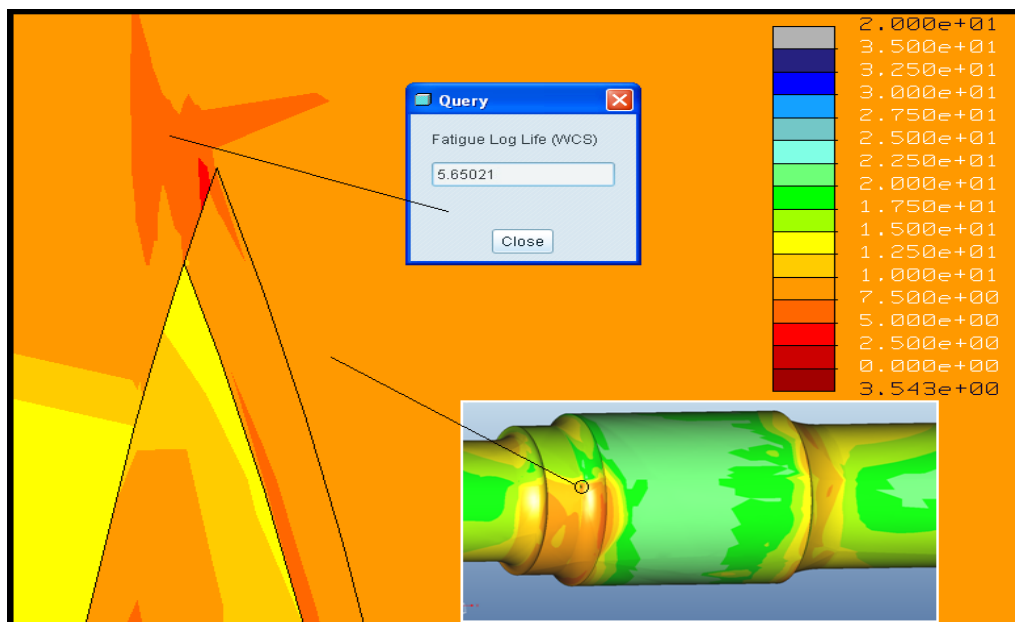


Ilustración 97. Ensayo a fatiga para una grieta de 4mm de longitud y $1,352 \cdot 10^6$ ciclos de carga.

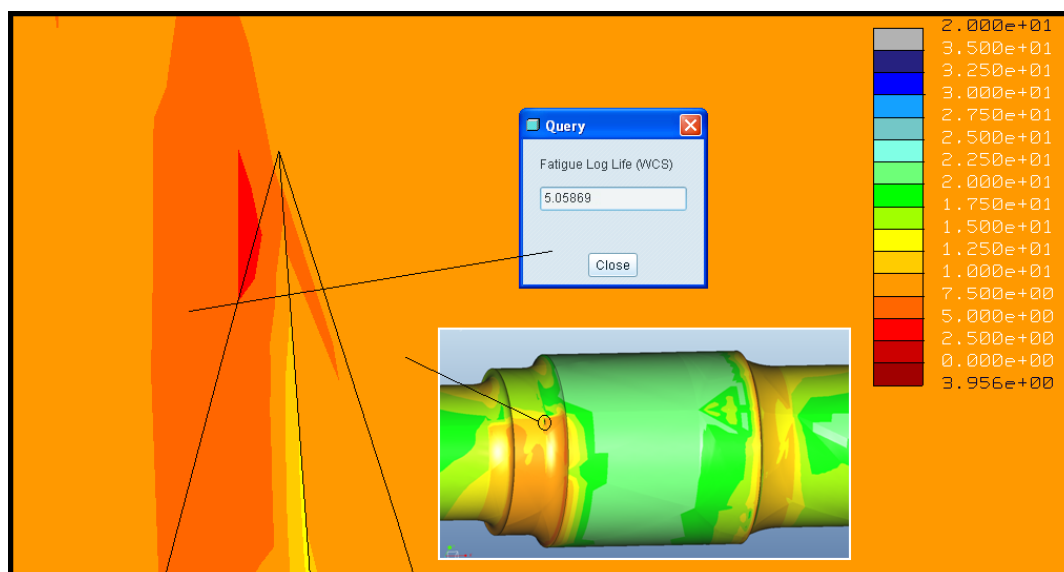


Ilustración 98. Ensayo a fatiga para una grieta de 6mm de longitud y $1,458 \cdot 10^6$ ciclos de carga.

Además, se ha elaborado una tabla para recoger todos los resultados obtenidos que se presenta a continuación.

Tabla 10. Resultados obtenidos.

Longitud de grieta (mm)	Ciclos que se someten	Exponente del número de ciclos (10^N)	Tanto por 1 de vida
0	0	7,32	1
0,5	234.000	6,41	0,87568306
1	520.000	6,1154	0,83543716
1,5	780.000	6,1085	0,83449454
2	988.000	5,98234	0,81725956
2,5	1.144.000	5,8145	0,7943306
3	1.248.000	5,76	0,78688525
3,5	1.300.000	5,72	0,78142077
4	1.352.000	5,65	0,77185792
4,5	1.414.000	5,56	0,75956284
5	1.430.000	5,42	0,74043716
5,5	1.456.000	5,344	0,73005464
6	1.458.000	5,058	0,69098361

Con estas nuevas características, se representa la gráfica que representa la evolución del exponente de vida a fatiga frente a la longitud de la grieta.

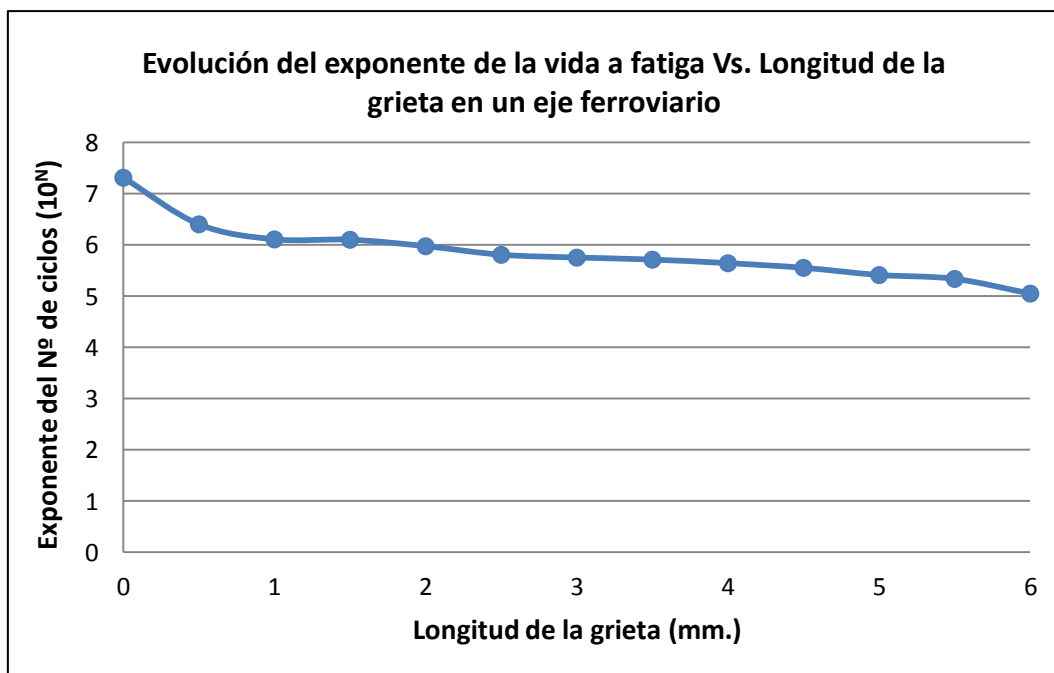


Ilustración 99. Gráfica que representa la evolución del exponente de la vida a fatiga frente a la longitud de la grieta.

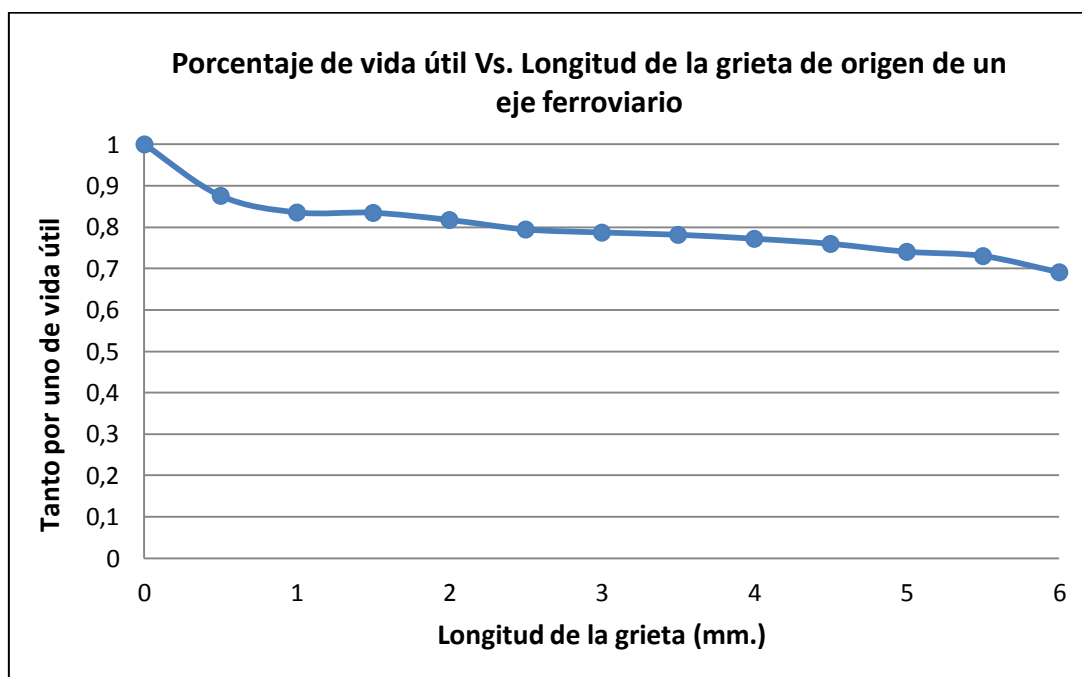


Ilustración 100. Tanto por uno de vida útil Vs. Longitud de grieta (mm).

Respecto a estas nuevas curvas, se pueden concluir varias cosas:

En relación a la curva de la ilustración 98, se puede destacar que la pérdida de vida no es tan brusca como en el estudio anterior, sino que ésta vez se trata de una curva mucho más suavizada, lo cual se debe al hecho de que en este estudio no se mantiene constante el número de ciclos, sino que se realiza una simulación de acumulación de fatiga, como ya se ha explicado.

Además en este caso, el cambio de pendiente más pronunciado se produce durante la inicialización de la grieta, es decir alrededor de los 0,5 mm de longitud, y no en 2,5 mm como antes.

Otro importante dato es que el eje sin fisuras, soportaría los 10^7 ciclos que exige la norma UNE-EN 13260 [12], concretamente $10^{7,32}$ ciclos de carga, lo cual da muestras de la similitud del ensayo con la realidad, porque a medida que aumenta el tamaño de grieta, el número de ciclos soportados se aleja de este valor, como ocurre normalmente.

En cuanto a la gráfica de la ilustración 99, se puede observar que el trazado es prácticamente igual que el de la primera, pero en ésta podemos apreciar el porcentaje de vida que le queda al eje, o lo que es lo mismo, el porcentaje de vida perdido. Por ejemplo a los 6 mm de longitud de grieta, la vida a fatiga ha disminuido aproximadamente un 30%.

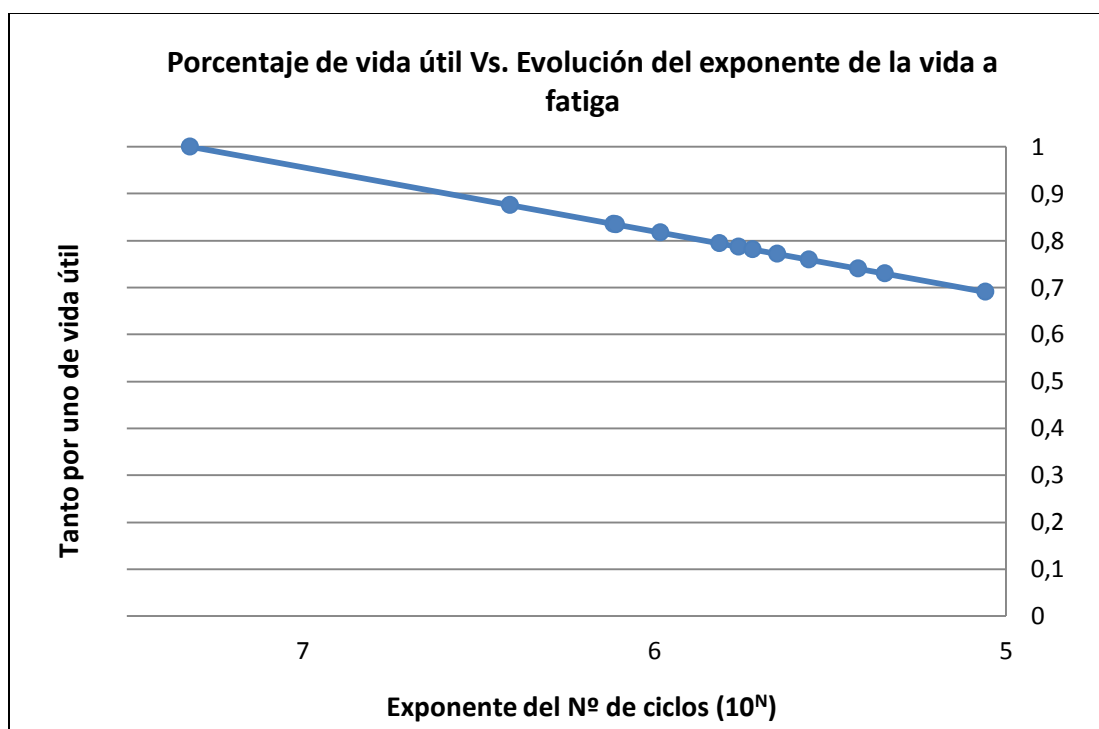


Ilustración 101. Tanto por uno de vida útil Vs. Exponente del N° de ciclos (10^N).



En esta curva lo que se puede apreciar es el tanto por uno de vida útil o la disminución de vida que experimenta el eje, en función del número de ciclos que soporta el mismo.

Es una mezcla entre las dos curvas expuestas previamente en la que no se muestran las longitudes de grieta, pero se pueden obtener resultados y conclusiones interesantes de ella.

Por ejemplo, cuando el eje no tiene fisuras y soporta $10^{7,32}$, su vida a fatiga es del 100%. Sin embargo, cuando el número de ciclos es de 10^6 , su vida es del 80%, como se puede apreciar.

Para este estudio se realizaron alrededor de 250 simulaciones entre análisis estáticos y de fatiga.



10.2.1. ESTUDIO DE LAS SINGULARIDADES ORIGINADAS EN LOS ANÁLISIS.

Debido a la eventual aparición de singularidades en grietas de tamaño considerable, se decidió realizar otro estudio paralelo, teniendo en cuenta la vida a fatiga en las propias singularidades, para ver la vida a fatiga mínima en la grieta y poder sacar conclusiones más acertadas entre ambos estudios.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos, a partir de los cuales se elaborarán las gráficas y se compararán con las obtenidas del estudio anterior.

Tabla 11. Resultados obtenidos tras el estudio de discontinuidades.

Longitud de grieta (mm)	Exponente del número de ciclos (10^N)	Tanto por 1 de vida
0	7,32	1
0,5	6,41	0,87568306
1	6,1154	0,835437158
1,5	6,1085	0,834494536
2	5,98234	0,817259563
2,5	5,8145	0,794330601
3	5,76	0,760382514
3,5	5,72	0,718169399
4	5,65	0,688579235
4,5	5,56	0,661256831
5	5,42	0,630655738
5,5	5,344	0,623907104
6	5,058	0,545081967

A continuación se muestran las gráficas obtenidas a partir de los resultados de la tabla y su posterior comparación con las obtenidas en el estudio anterior, en el que no se tomaban los valores originados en las singularidades.

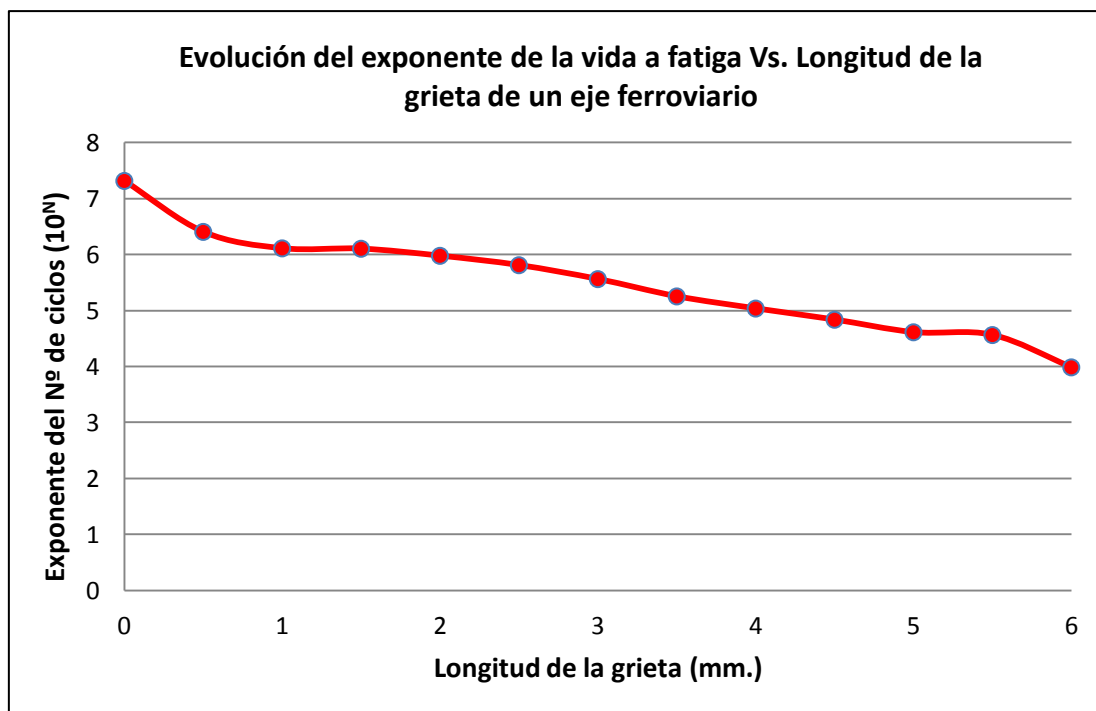


Ilustración 102. Gráfica que representa la evolución del exponente del número de ciclos (10^N) frente a la longitud de la grieta (mm) teniendo en cuenta las discontinuidades.

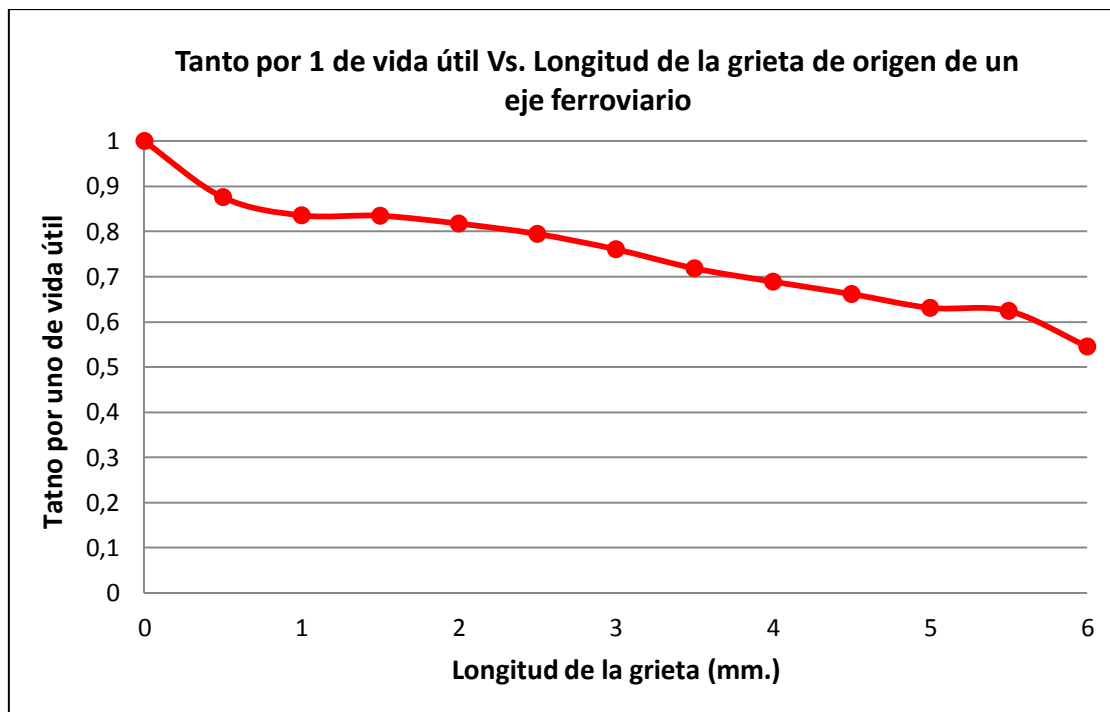


Ilustración 103. Gráfica que representa la disminución en porcentaje de vida frente a la longitud de la grieta (mm) teniendo en cuenta las discontinuidades.

En la siguiente gráfica se han superpuesto las curvas de ambos estudios, para apreciar mejor la pendiente que adquiere cada uno de los análisis.

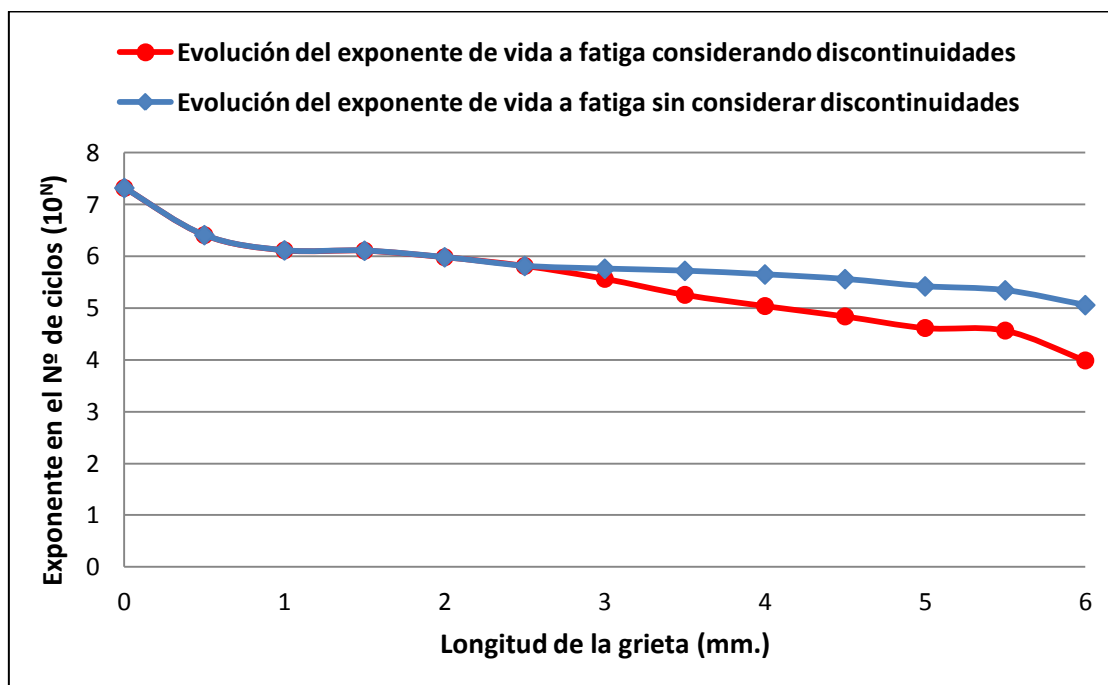


Ilustración 104. Gráfica que representa la comparación del estudio realizado teniendo en cuenta las discontinuidades (curva roja) y no teniéndolas en cuenta (curva azul).

Como se puede apreciar, para las primeras longitudes de grieta, desde 0 mm hasta 2.5 mm no aparecen singularidades, por tanto ambas curvas se superponen, sin embargo, a partir de 2.5 mm la curva roja, perteneciente a los análisis en los que se han tenido en cuenta las singularidades, adquiere mayor pendiente que la curva azul, en la cual se obviaron.

Esto quiere decir que la vida a fatiga del eje para el análisis en el que se tienen en cuenta las singularidades es menor que sin tenerlas en cuenta, ya que los resultados son más críticos.

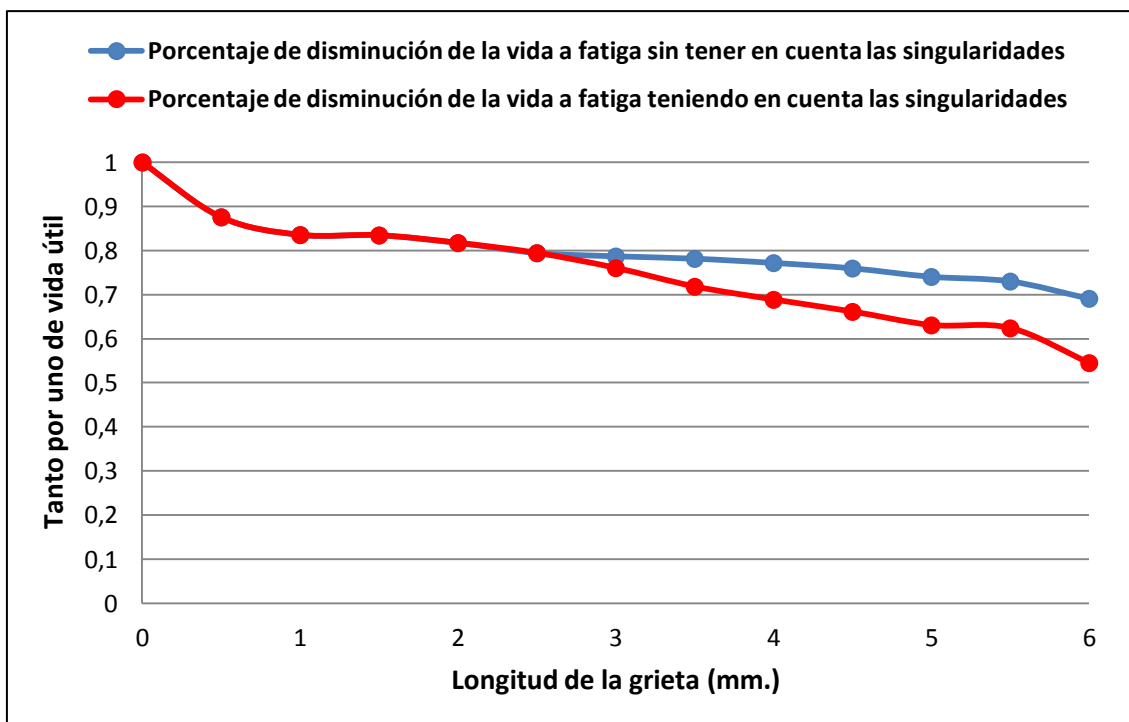


Ilustración 105. Disminución de la vida a fatiga frente al aumento en longitud de la grieta considerando discontinuidades (curva roja) y sin considerar discontinuidades (curva azul).

En este caso, al igual que en la gráfica anterior, se puede ver una diferencia considerable en la pendiente de ambas curvas.

Del mismo modo que antes, sólo se aprecia esta diferencia una vez superados los 2.5 mm de longitud de grieta, que es el momento en el que comienza a haber singularidades.

Concluyendo con este estudio, cabe decir que la aparición de singularidades es un factor muy importante a la hora de la recogida de datos. Por tanto se deben evitar en gran medida estas singularidades originadas en el programa.

Una solución para evitar singularidades sería refinar el tamaño máximo del elemento de la malla hasta el menor posible. Dicho estudio, se llevará a cabo en apartados posteriores.

Seguidamente se representa la comparación de la curva expresada en la ilustración 93 con la curva experimental del material mostrada anteriormente (Ilustración 98).

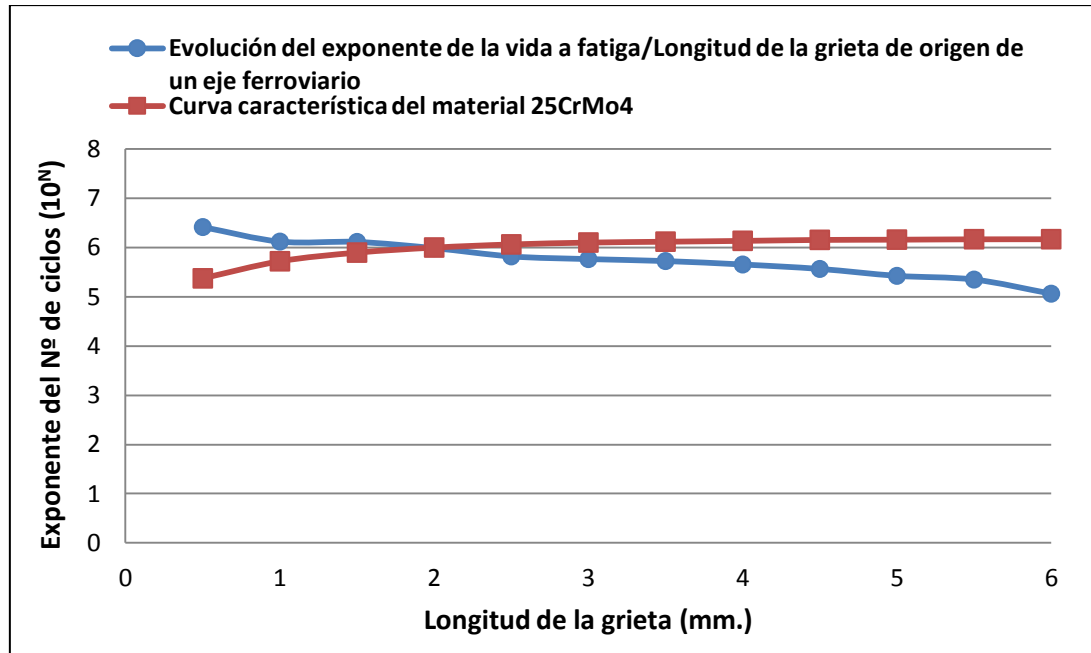


Ilustración 106. Gráfica que representa la evolución del exponente de vida a fatiga junto con la curva experimental del material.

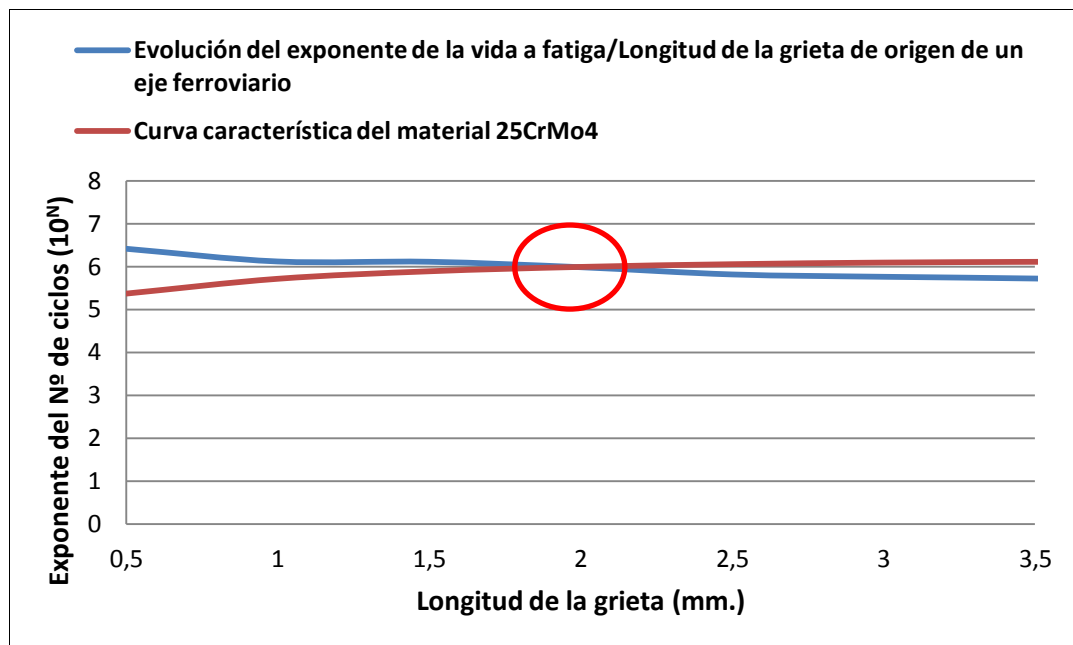


Ilustración 107. Punto de corte entre la curva de la evolución del exponente de vida a fatiga con la curva experimental del material.



Lo que se aprecia en las ilustraciones 105 y 106 es que ambas curvas se cruzan en un punto. Este punto permite que estas representaciones se puedan dividir en dos partes.

La primera parte muestra un comportamiento aceptable, ya que la curva azul está por encima de la curva roja o del material, lo cual indica que el eje aguantará más de los ciclos a los que está sometido con esa longitud de grieta, según se puede apreciar en la curva experimental del material.

Sin embargo, en la segunda parte, a partir de 2 mm, la curva calculada está por debajo de la experimental, lo que indica que el eje no aguantará los ciclos a los que es sometido, con lo cual sería inservible.

Por lo tanto, con este estudio se puede concluir finalmente que a partir de 2 mm es aconsejable cambiar el eje, además estimar la vida a fatiga una vez superada esta longitud de grieta sería muy complicado, y no soportaría las condiciones de servicio para las cuales fue diseñado.

Para este estudio se realizaron un total de 50 simulaciones, entre análisis estáticos y de fatiga.

ESTUDIO DE MODIFICACIÓN. VARIACIÓN DEL TAMAÑO DEL ELEMENTO MÁXIMO EN LA MALLA.

Como se ha explicado anteriormente, a continuación se realizará un estudio en el que se reducirá el tamaño de elemento máximo de la malla para comparar los resultados con los estudios anteriores y obtener conclusiones sobre el mallado.

Lo primero que se hace es generar la malla en el elemento. El proceso es el siguiente:

Aplicaciones → Mechanica → AutoGEM → Crear

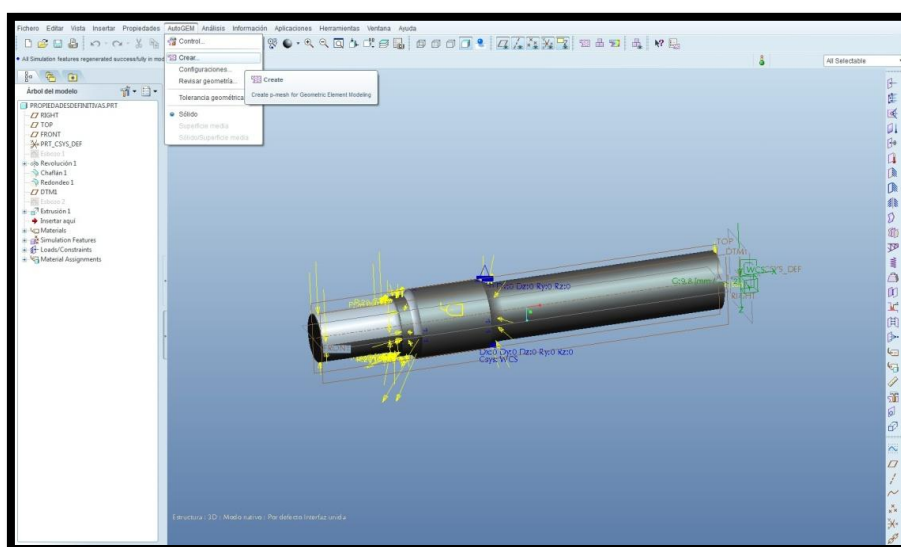


Ilustración 108. Creación de la malla.

Una vez seguida la ruta citada anteriormente aparece la ventana expuesta en la siguiente ilustración.

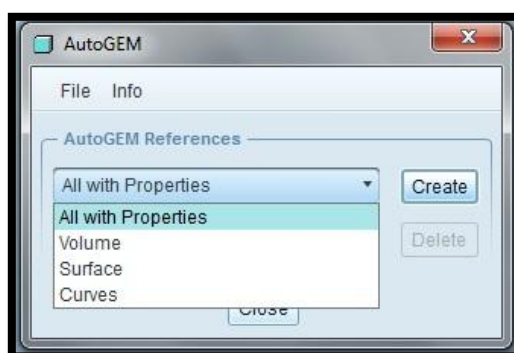


Ilustración 109. Ventana AutoGEM.

En la casilla *AutoGEM References* hay que seleccionar la opción *All with properties*, y pinchar en la opción *Create*.

El resultado que aparece es el que se muestra en la siguiente ilustración:

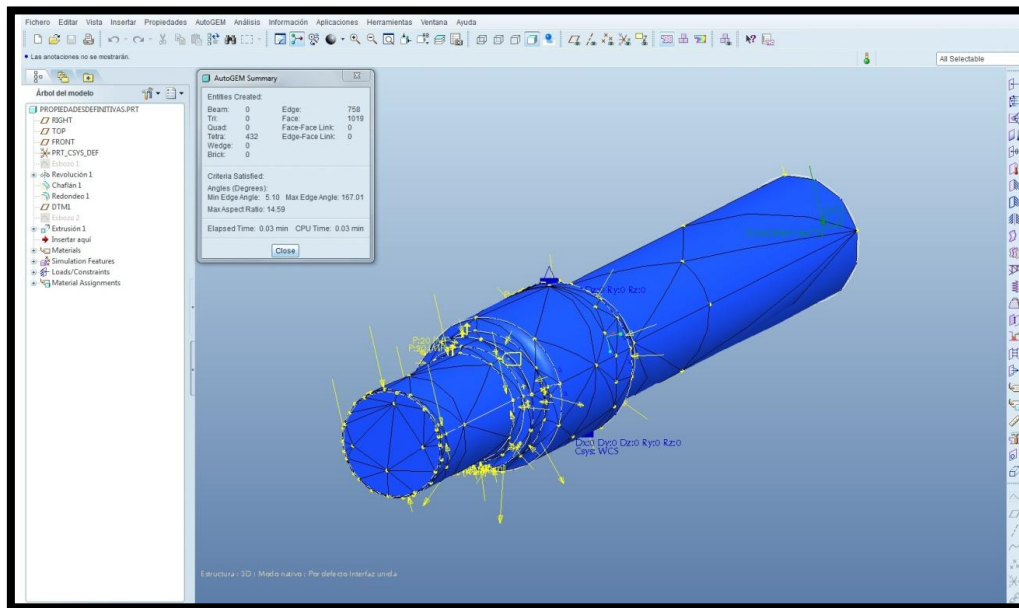


Ilustración 110. Malla generada mediante AutoGEM.

Una vez creada la malla, lo que se hará después es refinar el tamaño máximo de los elementos en las zonas más críticas, que son los cambios de sección. Para ello, utilizamos la opción *Control* de la herramienta *AutoGEM*.

En la siguiente ilustración, se puede apreciar cómo se seleccionan las secciones críticas del eje y se refinan con un tamaño de elemento máximo de 10 mm.

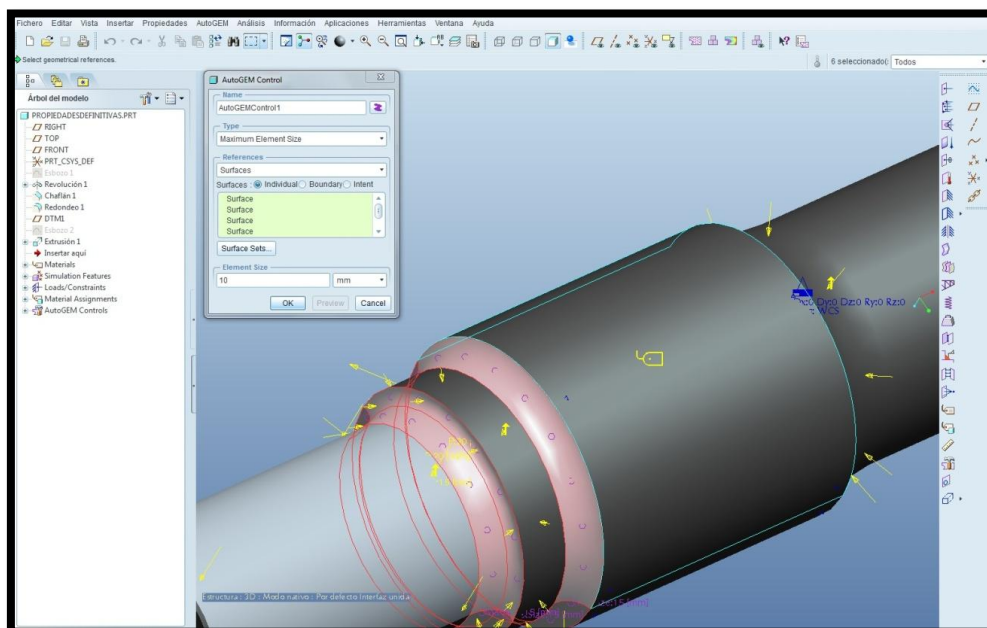


Ilustración 111. Refinamiento de malla mediante la herramienta AutoGEM Control.

Una vez refinada la malla se visualiza y se actualiza la malla con el nuevo tamaño. La ilustración siguiente muestra la disposición de la malla refinada.

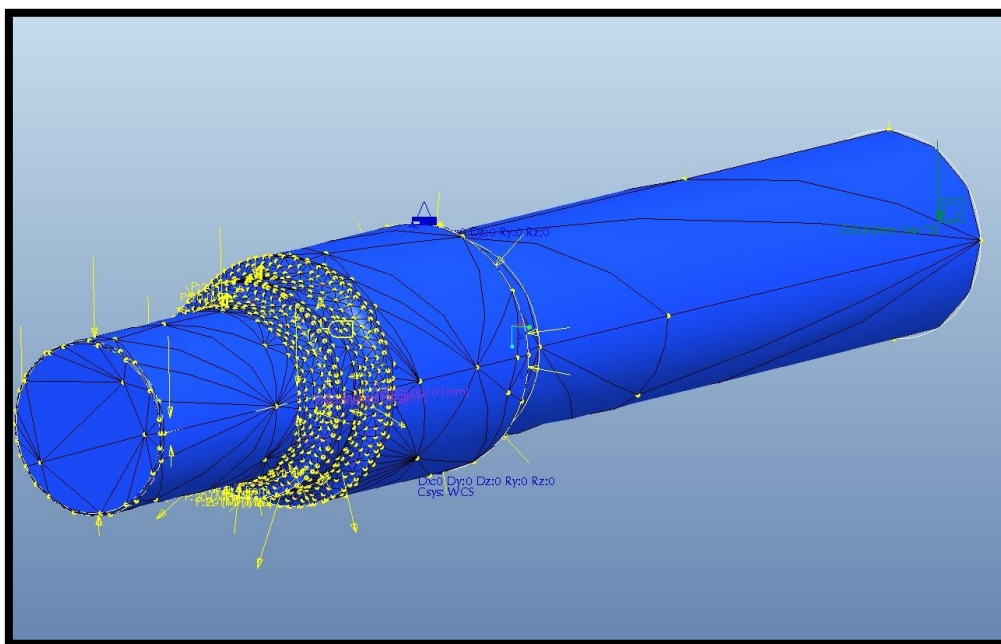


Ilustración 112. Malla refinada.

Como se puede apreciar en la ilustración, se observa un gran aumento del número de nodos en la zona donde se ha aplicado el control.

Una vez refinado el elemento, se vuelven a llevar a cabo los ensayos realizados a lo largo del presente proyecto con el objetivo de estudiar la influencia de la malla sobre los resultados obtenidos.

El hecho de que se haya elegido 10 mm como tamaño de elemento máximo se debe a que es el menor valor que admite el programa sin que se produzcan errores de cálculo a la hora de realizar los análisis. Previamente se hicieron pruebas con valores comprendidos entre 15 y 1 mm, y 10 mm fue el mínimo valor admitido.

Para completar este análisis se han alcanzado las 80 simulaciones, y no se han tenido en cuenta las posibles singularidades que aparecieron en la grieta.

A continuación se presentan los resultados de los análisis del mismo estudio con la malla de 15 mm comparándolos con la modificación de 10 mm obtenidos en este estudio.

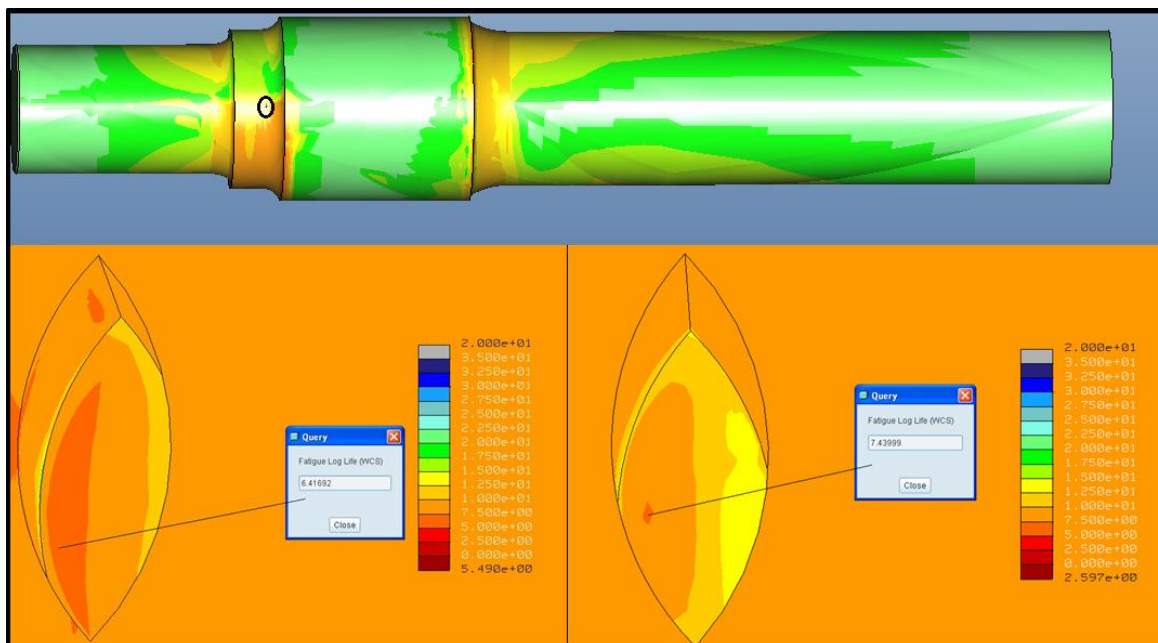


Ilustración 113. Ensayo de fatiga practicado sobre un eje ferroviario al que se le ha practicado una grieta de 0,5 mm de longitud se le ha aplicado un refinamiento de la malla de 15 mm (imagen izquierda) y de 10 mm (Imagen derecha).

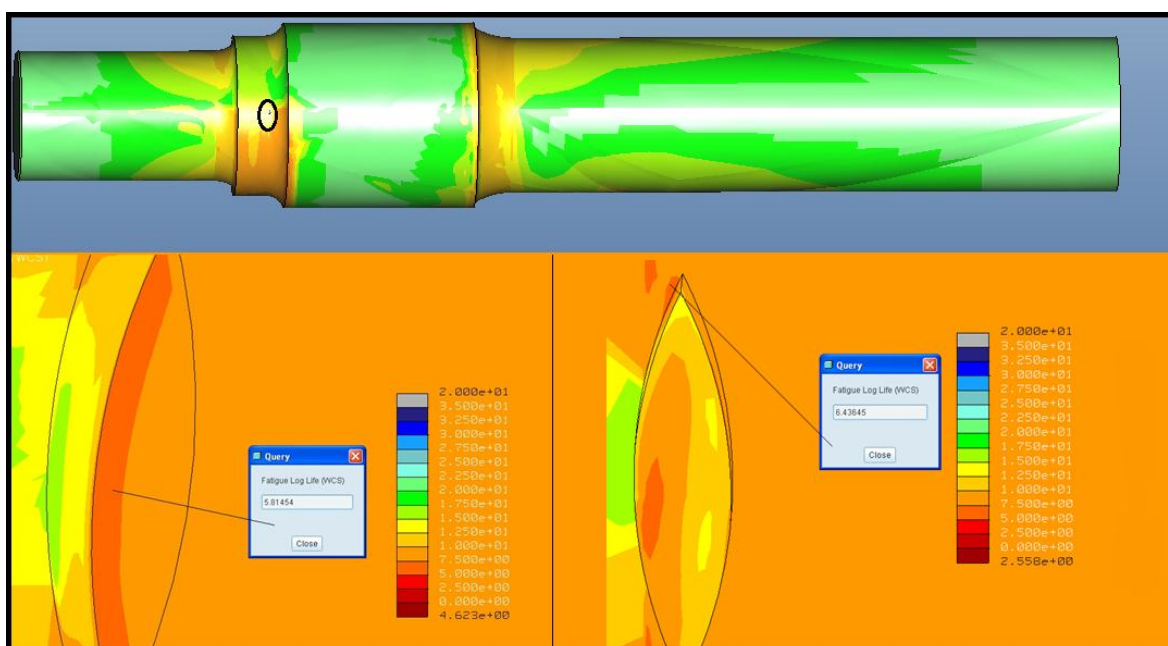


Ilustración 114. Ensayo de fatiga practicado sobre un eje ferroviario al que se le ha practicado una grieta de 2,5 mm de longitud se le ha aplicado un refinamiento de la malla de 15 mm (imagen izquierda) y de 10 mm (Imagen derecha).

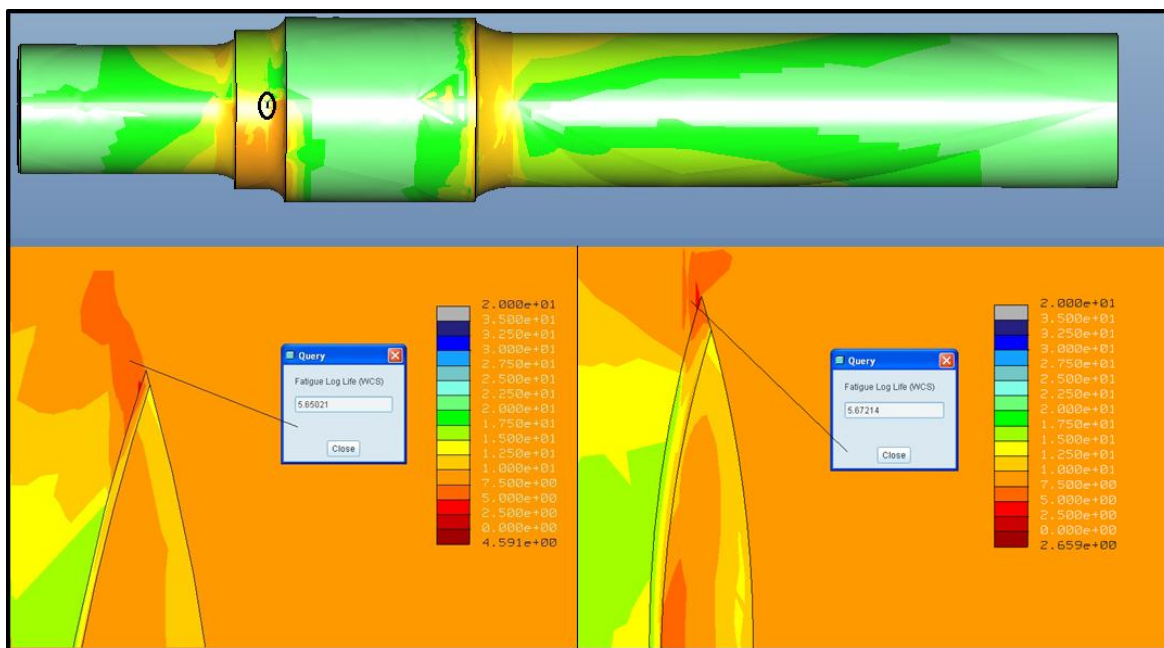


Ilustración 115. Ilustración: Ensayo de fatiga practicado sobre un eje ferroviario al que se le ha practicado una grieta de 4 mm de longitud se le ha aplicado un refinamiento de la malla de 15 mm (imagen izquierda) y de 10 mm (Imagen derecha).

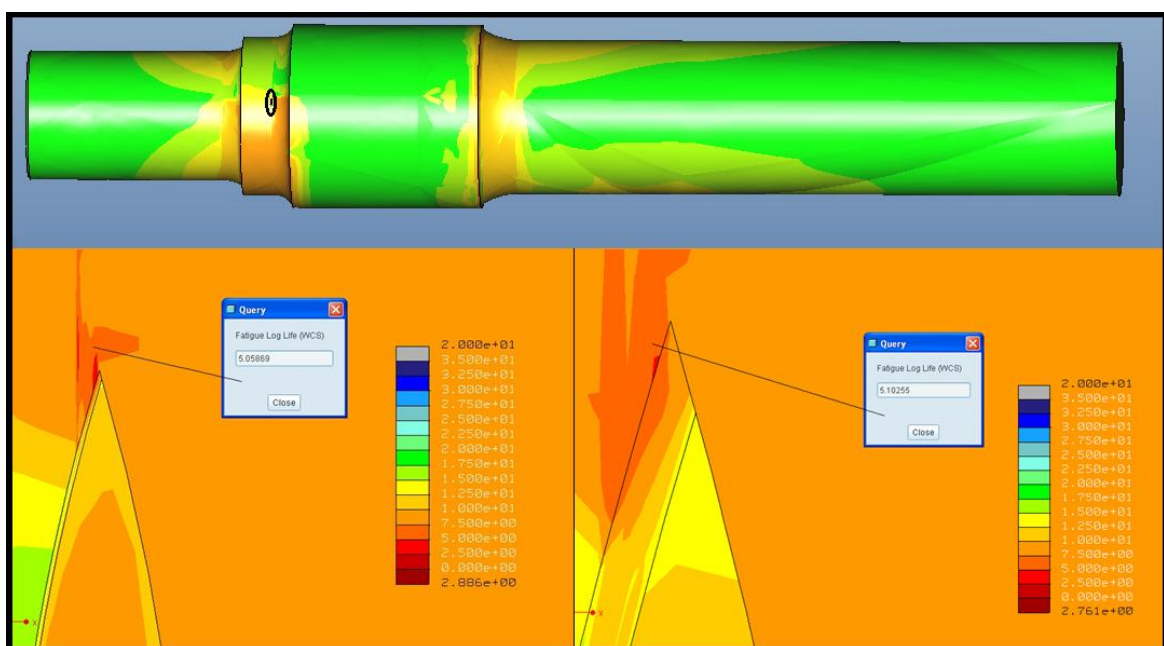


Ilustración 116. Ilustración: Ensayo de fatiga practicado sobre un eje ferroviario al que se le ha practicado una grieta de 6 mm de longitud se le ha aplicado un refinamiento de la malla de 15 mm (imagen izquierda) y de 10 mm (Imagen derecha).

Tabla 12. Resultados obtenidos tras el estudio con refinamiento de malla de 10 mm.

Longitud de grieta (mm)	Ciclos (10^N)	%vida útil	Ciclos que se someten
0	7,9622	1	0
0,5	7,43	0,93315918	234.000
1	6,92	0,86910653	520.000
1,5	6,63	0,83268443	780.000
2	6,501	0,81648288	988.000
2,5	6,436	0,80831931	1.144.000
3	6,1492	0,77229911	1.248.000
3,5	5,94	0,74602497	1.300.000
4	5,67	0,71211474	1.352.000
4,5	5,34	0,67066891	1.414.000
5	5,2125	0,65465575	1.430.000
5,5	5,18	0,65057396	1.456.000
6	5,102	0,64077767	1.458.000

Las siguientes dos gráficas expresadas representan la nueva gráfica que representa la evolución del exponente de vida a fatiga frente a la longitud de la grieta, además de una comparación con la gráfica obtenida en los apartados previos.

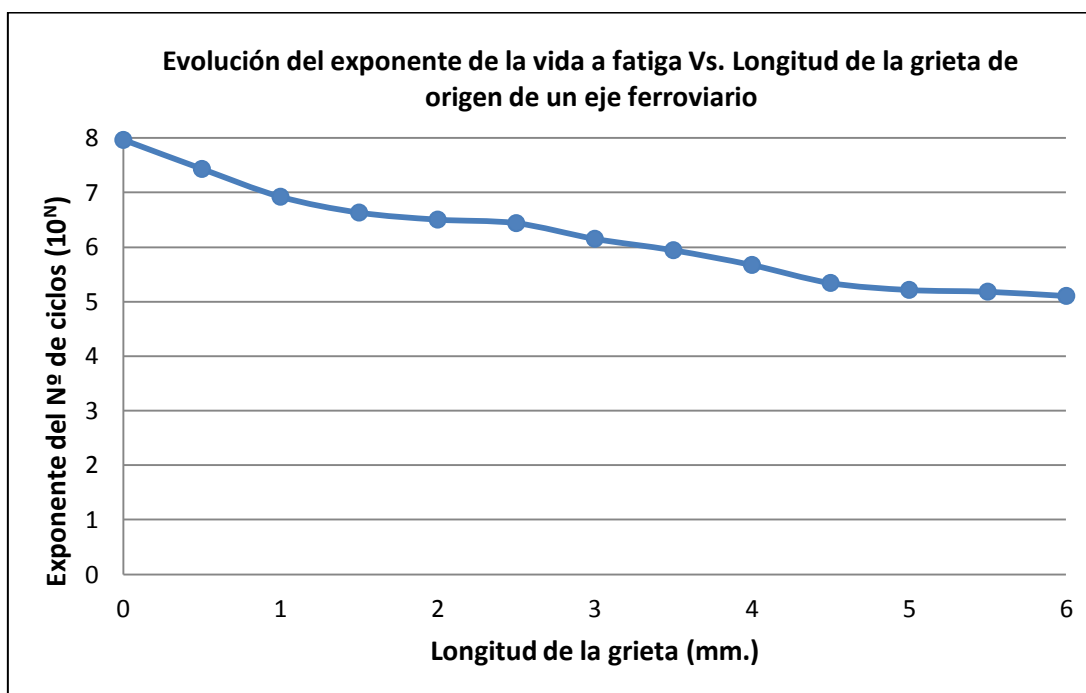


Ilustración 117. Gráfica que representa la evolución del exponente del Nº de ciclos (10^N) frente a la longitud de grieta (mm).

La siguiente gráfica presentada es la comparación de los nuevos resultados con los obtenidos cuando el tamaño máximo de elemento era de 15 mm.

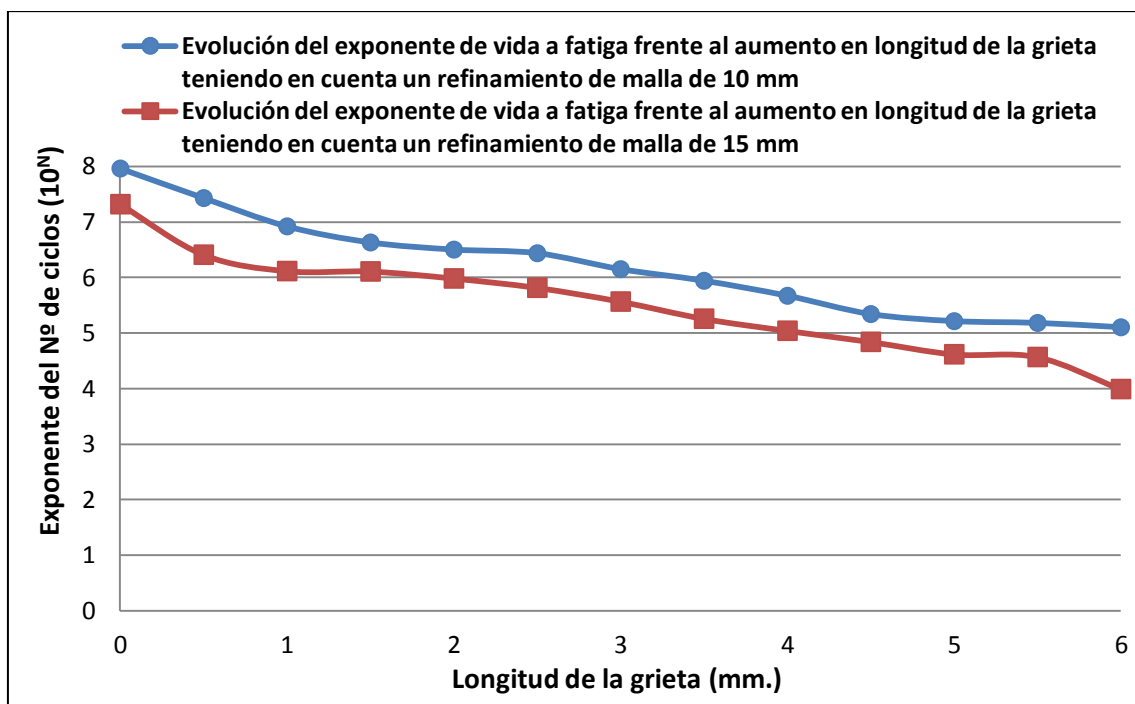


Ilustración 118. Comparación de las curvas que representan la evolución del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de la grieta (mm), habiendo aplicado un refinamiento de malla de 10 mm (curva azul) y de 15 mm (curva roja).

Como se puede apreciar, al modificar el tamaño máximo del elemento a 10 mm en las zonas refinadas, los valores de vida a fatiga aumentan respecto al estudio anterior.

Esta peculiaridad se le atribuye a que al disminuir el tamaño máximo en las zonas refinadas se reducen también las singularidades por lo que se pueden tomar valores mayores y conseguir un mayor nivel de detalle en los resultados, obteniendo una curva mas suavizada y conservadora como se puede apreciar en las ilustraciones obtenidas en los análisis.

Seguidamente, mediante la exposición de las siguientes curvas comprobaremos si existe diferencia en cuanto al estudio anterior.

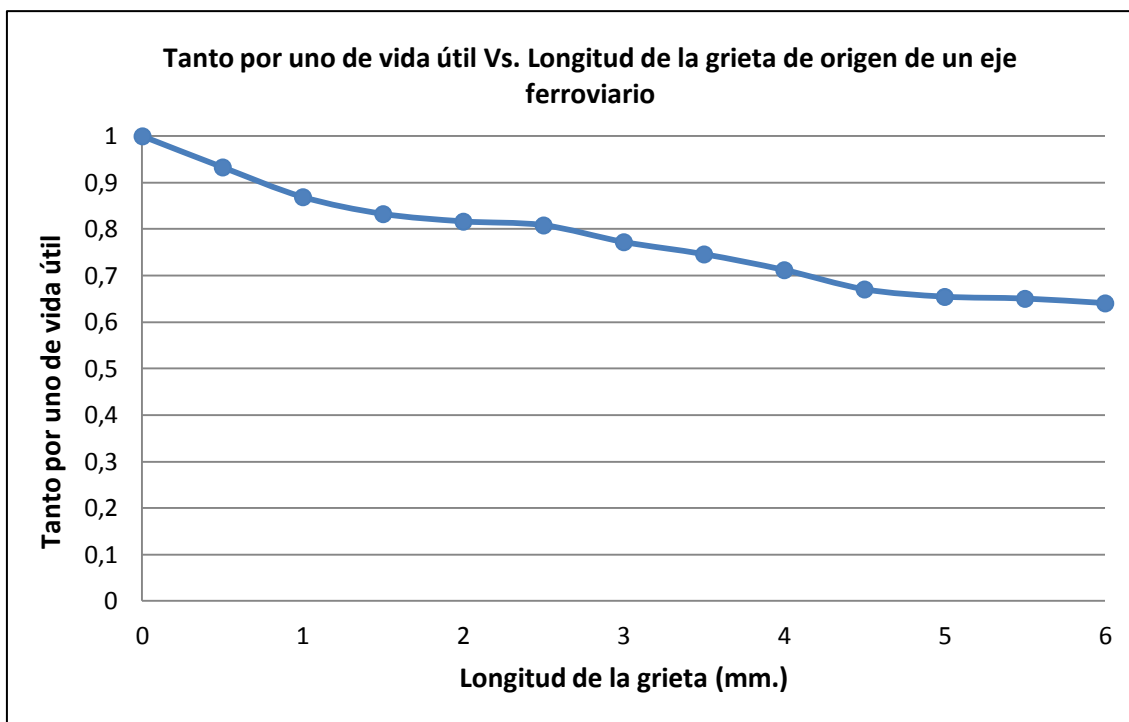


Ilustración 119. Gráfica que representa la evolución del tanto por uno de vida a útil frente a la longitud de grieta (mm).

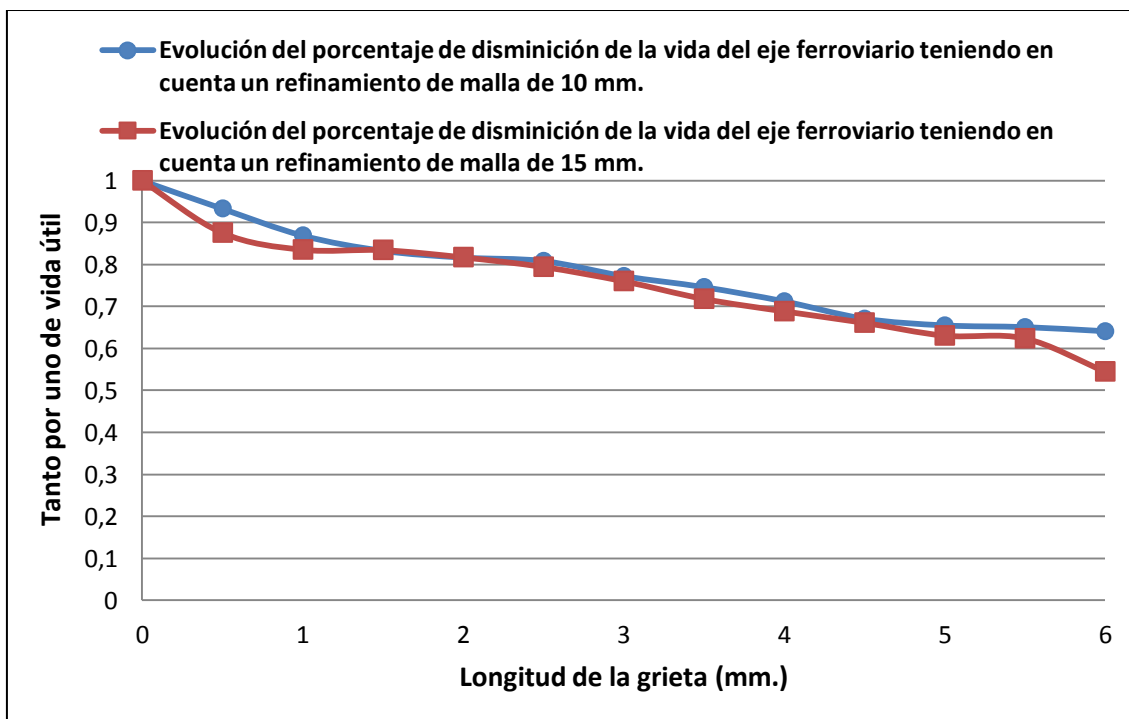


Ilustración 120. Comparación de las curvas que representan el tanto por uno de vida útil frente a la longitud de la grieta (mm) aplicando un refinamiento de malla al eje de 10 mm (curva azul) y de 15 mm (curva roja).



En la ilustración 120 se aprecia, que la nueva gráfica que representa cómo evoluciona el tanto por uno de vida útil frente a la longitud de la grieta, guarda en general una buena similitud con la obtenida en el análisis anterior, con la diferencia de que la nueva curva cambia su pendiente en la inicialización de la grieta.

Por esta razón se puede concluir en este estudio que el nuevo refinamiento de la malla en las zonas más críticas del eje influye en la toma de resultados, pero aún así el comportamiento del eje no cambia significativamente, como queda demostrado.



11. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS



11. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

11.1. CONCLUSIONES

Tras finalizar este trabajo, puede concluirse que el objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera se ha cumplido plenamente: se ha conseguido estudiar la influencia de variaciones geométricas en la vida a fatiga de un eje ferroviario mediante el programa Pro Engineer.

La primera y más importante aportación de este proyecto es la creación de un método para estimar la vida a fatiga de ejes ferroviarios mediante curvas experimentales. La diferencia respecto a métodos utilizados en proyectos previos, es que se tendrán en cuenta el número de ciclos de carga aplicados previamente, simulando así la propagación de la grieta y la disminución de la vida del eje a medida que aumenta el tiempo de uso o servicio.

El primer estudio que se realizó fue un estudio de verificación, para comprobar el correcto funcionamiento del programa a la hora de realizar análisis estáticos. Para ello se realizó un estudio de precarga con el cual se obtuvo lo siguiente:

- A medida que se ha ido aumentando el valor de precarga aplicado, se han producido incrementos de tensión y desplazamiento, con un comportamiento lineal, verificando así el correcto funcionamiento.

A continuación se realizó un segundo estudio de verificación, siendo esta vez el objeto del mismo, la vida a fatiga. Las conclusiones mostradas a continuación se pueden apreciar en la ilustración 121.

- Cuando la grieta aún no se ha iniciado, el eje soportará los ciclos que exige la norma UNE-EN13260 [12].
- A partir de 2,5 mm de longitud de grieta se producen los daños más catastróficos en el eje, ya que es donde su pendiente varía de manera más brusca.
- En el momento en que la grieta alcanza los 10 mm de longitud la pendiente de la curva se estabiliza.

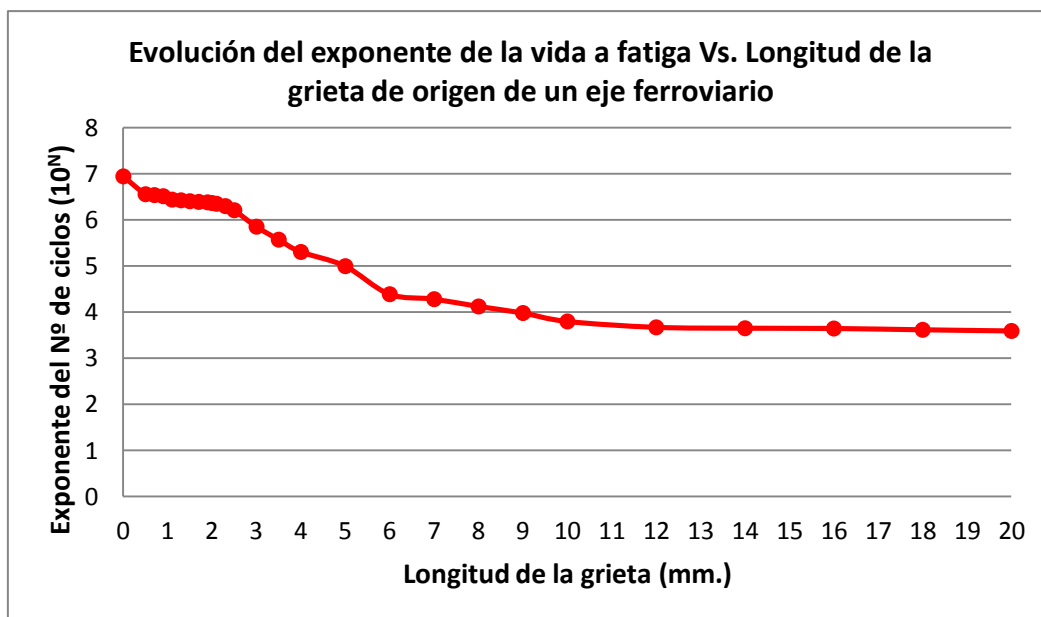


Ilustración 121. Curva que muestra la evolución del exponente del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de grieta (mm.).

Una vez comprobado que los resultados obtenidos eran coherentes, se comenzó con el estudio principal del proyecto, el estudio de la vida a fatiga con un número de ciclos variable haciendo uso de curvas experimentales, del cual se obtuvieron importantes conclusiones:

- La pérdida de vida no es tan brusca como en el estudio anterior, lo cual es debido a la acumulación de ciclos, y no a la aplicación de un número constante de ellos.
- El cambio de pendiente más pronunciado, o la mayor pérdida de vida, se produce durante la inicialización de la grieta, es decir alrededor de los 0,5 mm de longitud, y no en 2,5 mm como en el caso anterior.
- Cuando la grieta aún no se ha iniciado, el eje soportará los ciclos que exige la norma UNE-EN13260 [12].
- Como se puede observar en la ilustración 122, alrededor de los 2 mm de longitud de grieta es cuando el eje deberá ser sustituido y no podrá continuar su vida en servicio.

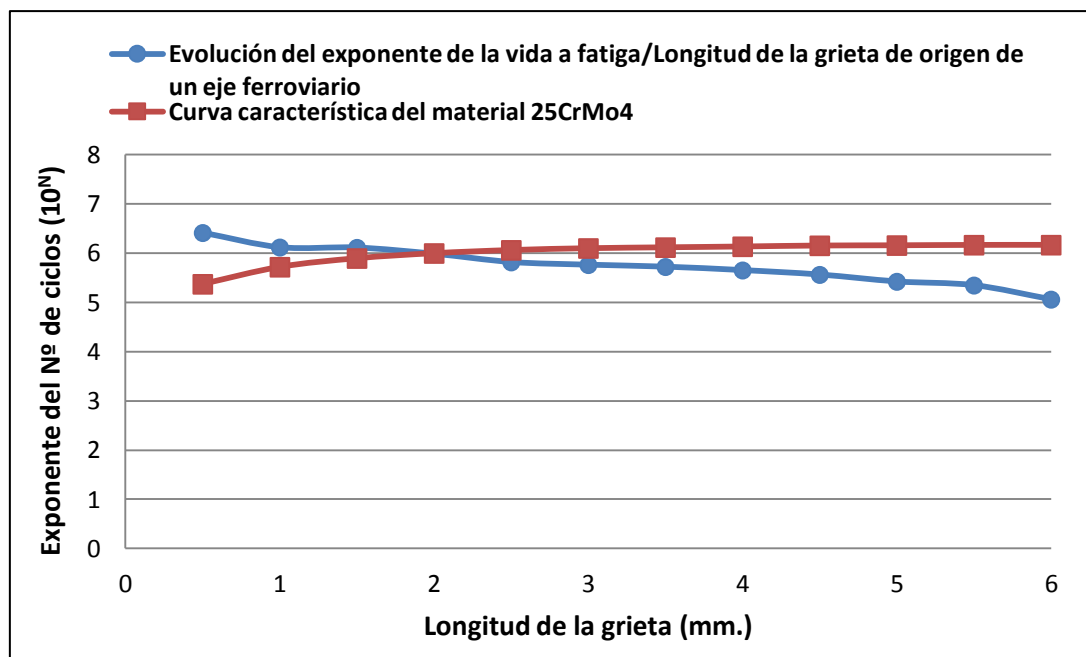


Ilustración 122. Gráfica que representa la evolución del exponente de vida a fatiga frente a la longitud de grieta, junto con la curva experimental del material.

Durante la realización de estos análisis con grietas de tamaño considerable se detectaron importantes singularidades, por tanto se analizaron en un estudio paralelo al anterior.

- A partir de 2,5 mm de longitud de grieta se pueden observar singularidades, y es cuando se aprecia la diferencia entre la pendiente de la curva sin discontinuidades y la curva con ellas.
- Al existir discontinuidades se obtienen valores más críticos, que sesgan los resultados finales, lo cual debe ser corregido aplicando una malla más refinada.

Como último estudio, se realizó una variación en el mallado, disminuyendo el tamaño de elemento máximo, con el objetivo de refinar más las zonas críticas y observar así las posibles diferencias con el mallado original.

Observando la gráfica mostrada en la ilustración 123, lo que se puede concluir es lo siguiente:

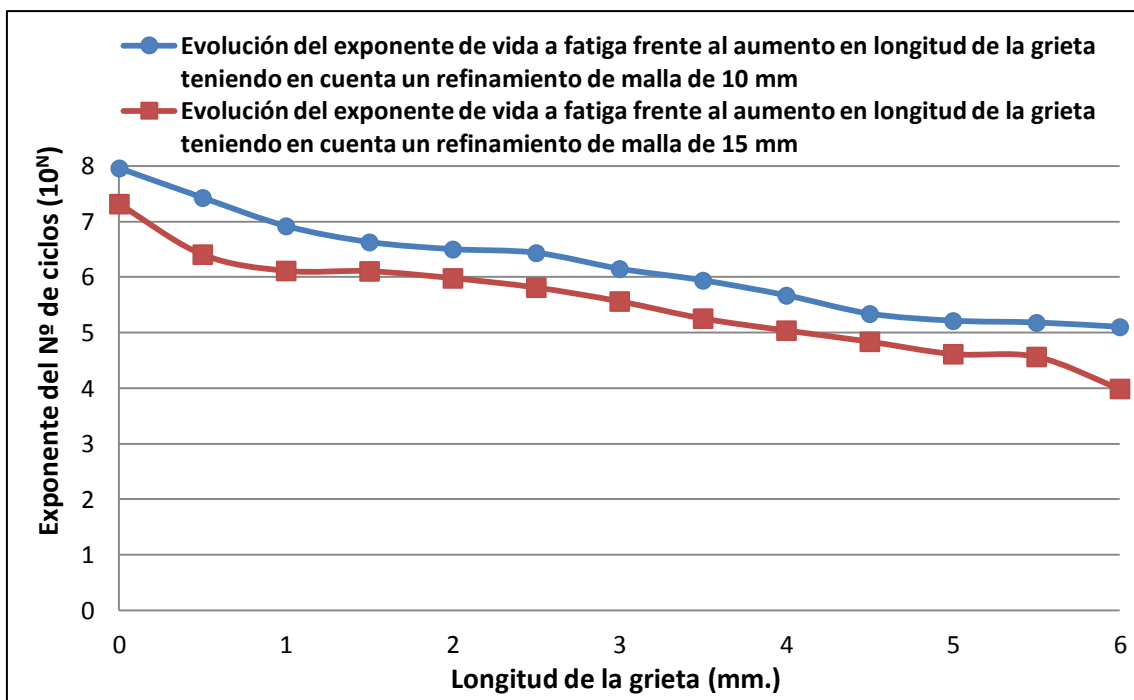


Ilustración 123. Comparación de las curvas que representan la evolución del N° de ciclos (10^N) frente a la longitud de la grieta (mm), habiendo aplicado un refinamiento de malla de 10 mm (curva azul) y de 15 mm (curva roja).

- Al disminuir el tamaño máximo del elemento a 10 mm en las zonas refinadas, los valores de vida a fatiga aumentan respecto al estudio realizado con 15 mm.
- La curva tiene un aspecto más suave que en el estudio anterior.
- Durante la inicialización de la grieta se reduce la pérdida de vida a fatiga, como se puede apreciar en la pendiente.

Observando los resultados y comparándolos con los de la literatura técnica empleada, se puede afirmar que se asemejan bastante a la realidad dado que se puede apreciar claramente la disminución de vida a fatiga que sufre el eje a medida que aumentan los ciclos de carga y la longitud de grieta. Por tanto, se puede concluir así, que se han conseguido todos los objetivos planteados al inicio y que el uso de esta herramienta para el estudio del fenómeno de fatiga es aceptable.



11.2. TRABAJOS FUTUROS.

Dado que *Pro Engineer* es un programa relativamente reciente en nuestra Universidad, y nunca antes se había tratado de realizar con este software un estudio sobre fatiga en ejes ferroviarios a través de curvas experimentales, se realizaron algunas simplificaciones que facilitaran y rebajaran los tiempos de cálculo para centrarse más sobre el tema en cuestión y poder así realizar una mayor variedad de análisis.

Sabiendo esto y a la vista de las conclusiones obtenidas, posibles temas futuros de estudio podrían ser los expuestos a continuación:

- Conseguir mediante *Pro Engineer* la inicialización de la grieta con tamaños menores de 0.5 mm.
- Conseguir la disminución del tamaño de elemento máximo en la malla en las zonas con refinamiento hasta valores inferiores a 10 mm.
- Realización del mismo estudio de fatiga para el acero estándar A1N utilizado en ejes ferroviarios, con sus correspondientes curvas experimentales.
- Realización del mismo estudio de fatiga con diferentes programas de elementos finitos, con una posterior comparación para ver los criterios que utiliza cada programa y concluir cuál se aproxima más a la realidad.
- Repetición del mismo estudio de fatiga sin la realización de simplificaciones sobre el eje, es decir, sin despreñar los taladros en los extremos ni los cambios de sección interiores.



12. PRESUPUESTO



12. PRESUPUESTO.

La realización y consecución del presente proyecto ha transcurrido durante un proceso cronológico de 36 semanas (8 meses). En dicho proceso, se han seguido las siguientes etapas explicadas en apartados anteriores.

1. Planteamiento de los objetivos del Proyecto.
2. Estudio de la teoría y manuales relacionados con los objetivos del Proyecto.
3. Estudio y aprendizaje del software de diseño Pro/ENGINEER.
4. Modelado del eje.
5. Modelado de las grietas.
6. Diseño de la metodología de los análisis.
7. Realización de las simulaciones con el software Pro/ENGINEER.
8. Interpretación de los resultados.
9. Realización de la memoria teórica.

A continuación, la siguiente ilustración muestra el cronograma en el cual se expresan las actividades antes nombradas y la duración de cada actividad en semanas.

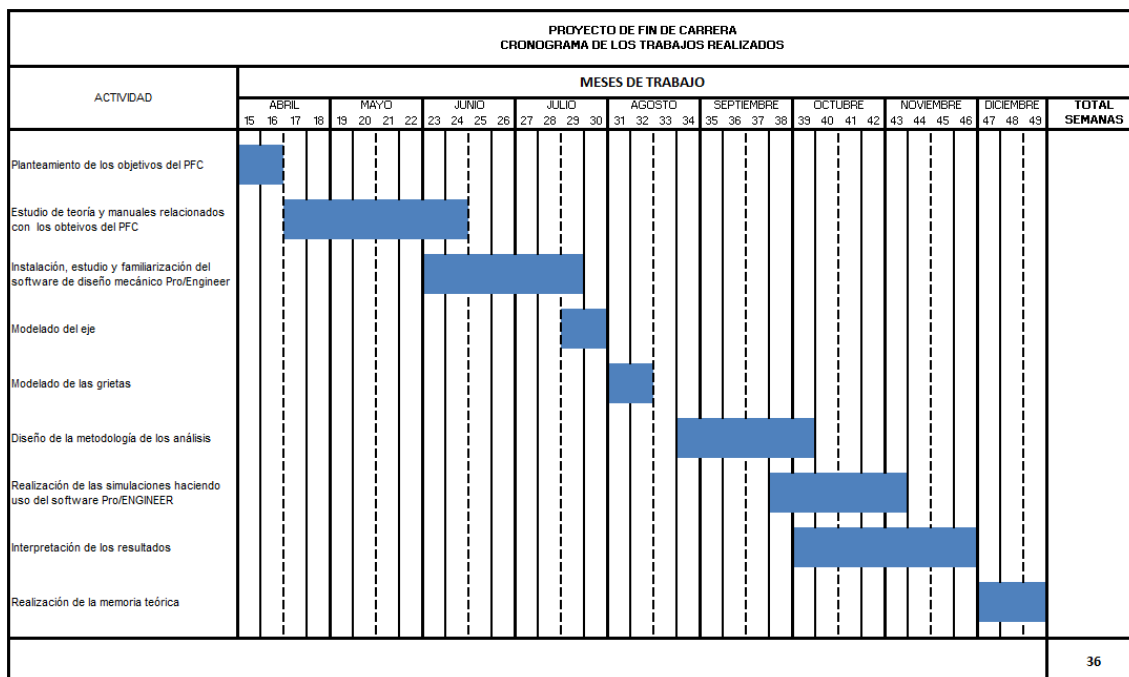


Ilustración 124. Cronograma de los trabajos realizados.



- Costes.

A este proyecto se le imputan unos costes económicos. Para ello se calcularán las horas empleadas en las etapas descritas y reflejadas en el cronograma y, posteriormente, se les aplicará un coste por hora.

Además, a estos costes hay que incluir el coste de la estación de trabajo, el cual se compone de un ordenador y una impresora láser. El coste del ordenador y de la impresora son 1800 € y 500 € respectivamente.

También se considerará el coste anual de la licencia del software Pro/ENGINEER, que asciende a un total de 6000 €/año.

No obstante, no se aplicarán estos costes íntegros, sino que se aplicará un coste imputable el cual se explica a continuación:

- Para calcular el coste imputable a la estación de trabajo hay que tener en cuenta que la depreciación del equipo se realiza en 24 meses y que se le dará un uso máximo al equipo de 8 meses. Por tanto, el coste imputable será:

$$(Coste\ imputable)_{ordenador} = 1800\ [€] \times \frac{8\ [meses]}{24\ [meses]} = 600€$$

$$(Coste\ imputable)_{impresora} = 500\ [€] \times \frac{8\ [meses]}{24\ [meses]} = 200€$$

- En cuanto el coste del software de diseño mecánico Pro/ENGINEER, se tendrá en cuenta que la amortización en este caso es 1/6, por tanto el coste imputable será para la licencia:

$$(Coste\ imputable)_{software} = 6000\ [€] \times (1/6)\ [1/año] = 1000€$$

A continuación, se detallan los costes correspondientes a los trabajos realizados para la consecución del presente proyecto.



Tabla 13. Desarrollo de costes del proyecto.

PERSONAL			
Descripción	Horas (h)	Coste por hora (€/h)	Coste imputable (€)
Documentación	40	25	1.000
Modelado de elementos	80	52	4.160
Ingeniería: simulación y análisis	200	85	17.000
Redacción de la memoria	80	25	2.000
EQUIPO			
Descripción	Coste (€)		Coste imputable (€)
Ordenador	1.800		600
Impresora láser	200		200
SOFTWARE			
Descripción	Coste (€)		Coste imputable (€)
Licencia Pro/ENGINEER	6.000		1.000
OTROS CONCEPTOS			
Descripción			Coste imputable (€)
Gastos en servicios de impresión y maquetación de documentos y otros			300
TOTAL GENERAL			26.260 €



13. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS



13. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] SHIGLEY, Joseph E. & MISCHKE, Charles R. *Diseño en ingeniería mecánica*. 6ª Edición. Editorial Mc Graw Hill. México 2004.
- [2] Documentación de la asignatura *Diseño de Máquinas*. Departamento de Ingeniería Mecánica. 3º de Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid. Curso 2009/2010.
- [3] Manual: *Introducción a Pro Engineer Wildfire 5.0*. 2010.
- [4] Manuel Martín, Miguel Fuentes y Manuel Pérez. *Análisis de un conjunto ferroviario con Pro Engineer*. Proyecto de Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Abril 2011.
- [5] Miguel Sánchez Muñoz. *Análisis a fatiga de un eje ferroviario de mercancías mediante el código Pro Engineer*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Febrero 2011.
- [6] Eva Marco. *Análisis a fatiga de un eje ferroviario mediante el programa Pro Engineer*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2010.
- [7] Luke, M.; Varfolomeev, I. *Fracture Mechanics Assessment of Railway Axles: Experimental Characterization and Computation*. Engineering Failure Analysis. Vol 17, p. 617-623. 2010.
- [8] Fonte, M.; Reis, L. *The effects of steady torsion on fatigue crack growth in shafts*. International Journal of Fatigue. Vol. 28, p. 609-617. 2006.
- [9] Beretta, S.; Carboni, M. *Variable amplitude fatigue crack growth in a mild steel for railway axles: experiments and predictive models*. Engineering Fracture Mechanics. 2010.
- [10] Zerbst, U.; Mädler, K. *Fracture Mechanics in Railway Applications- an overview*. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 72, p. 163-169. 2005.
- [11] Madia, M.; Beretta, S. *An Investigation of the Influence of Rotary Bending and Press Fitting on Stress Intensity Factors and Fatigue Crack Growth in Railway Axles*. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 75, p. 1906-1920. 2008.
- [12] Norma UNE-EN13260. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Requisitos de producto. Febrero 2010.
- [13] Norma Técnica de Circulación: N.T.C. MA007: Octubre 2007 (requisitos del material apto para circular a más de 160 Km/H).
- [14] Norma Técnica de Mantenimiento (Mantenimiento del material rodante RENFE).



[15] BOE núm. 290 Martes 4 diciembre 2007.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.

1. Empresa de consultoría técnica: *Iberisa*
<http://iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm>
Último acceso: 26-05-2011
2. Empresa de pruebas no destructivas: *Llogsa*
www.llogsa.com/nueva_web/tutoriales/
Último acceso: 28-05-2011
3. Empresa de consultoría técnica: *Leisure Technical Consultants Limited*
http://www.ltc.co.uk/NDT_Methods.htm
Último acceso: 15-11-2011
4. Empresa de inspección y diagnóstico técnico: *Isotec*
<http://www.isotec.com.co/portal2/>
Último acceso: 05-05-2011
5. Diario de información general: *El Mundo*
<http://www.elmundo.es/elmundo/2010/02/15/internacional/1266232846.html>
Último acceso: 17-10-2011
6. Foro especializado en trenes y ferrocarriles: *Forotrenes*
www.llogsa.com/nueva_web/tutoriales/
Último acceso: 28-05-2011
7. Observatorio Tecnológico de la Soldadura Desarrollada por el *Centro Tecnológico AIMEN*.
http://www.obtesol.es/index.php?option=com_content&task=category§ionid=5&id=13&Itemid=31
Último acceso: 24-05-2011
8. Diario de noticias de interés: *World Press*.
<http://tigrepelvar6.wordpress.com/2010/06/03/accidentes-ferroviarios-historicos-en-el-mundo-con-mas-de-200-muertos-hasta-mayo-2010/>
Último acceso: 10-11-2011



14. ANEXOS



14. ANEXOS

El plano mostrado a continuación es el del eje estudiado en este proyecto, no obstante ha de tenerse en cuenta que sobre el mismo se han llevado a cabo unas modificaciones o simplificaciones que se explicarán en este apartado. Dichas modificaciones se han llevado a consenso con el tutor del proyecto, por tanto han sido aprobadas por el mismo.

Son las siguientes:

- Se han decidido eliminar los dos cambios de sección interiores, donde irían colocados los frenos, dado que no se van a tener en cuenta en nuestro diseño. De esta forma evitamos tener estas zonas críticas que complicarían en cierto modo los análisis y no aportarían información de utilidad.
- Con el objetivo de simplificar el diseño, reduciendo así los tiempos de trabajo y el volumen de datos de cálculo con el que ha de trabajar nuestro programa, no se han realizado los taladros que hay en los extremos del eje. Esta decisión se fundamenta además en estudios anteriores, en los que se demuestra que su presencia no genera puntos críticos a la hora de obtener resultados.

PLANO EJE

